

**Thèse de doctorat**

**Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de  
VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS**

Discipline, spécialité selon la liste des spécialités pour lesquelles l'Ecole Doctorale est accréditée :

Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives – Biomécanique –

**Présentée et soutenue par Jessica, SCHIRO.**

**Le 20/03/2013, à Valenciennes**

**Ecole doctorale :**

Sciences Pour l'Ingénieur (SPI)

**Equipe de recherche, Laboratoire :**

Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines (LAMIH)

**Analyse biomécanique multidimensionnelle du geste de tourner le  
volant chez les conducteurs sans déficiences motrices**

**JURY**

**Président du jury**

- Thevenon, André. Professeur. Université de Lille II.

**Rapporteurs**

- Crétual, Armel. Professeur. Université de Rennes II.
- Morlier, Julien. Professeur. Université de Bordeaux II.
- Wang, Xuguang. Directeur de recherche. IFSTTAR, Bron.

**Examineur**

- Fuchs, Robert. Directeur de la technique et de l'innovation. JTEKT Europe, Nanterre.

**Directeur de thèse**

- Barbier, Franck. Professeur. Université de Valenciennes.

**Co-directeur de thèse :** Djemai, Mohamed. Professeur. Université de Valenciennes.

**Co-encadrant :** Pudlo, Philippe. Professeur. Université de Valenciennes.



« Faire rire c'est faire oublier. Quel bienfaiteur sur la terre qu'un distributeur d'oubli »  
V. Hugo

A mes parents, mes grands parents et mon frère...



## Remerciements

*Ya esta et qui l'aurait cru...*

La thèse envoyée, je profite de ces quelques jours de répit pour me remémorer mes débuts à Ch'timiland. Pour ceux qui me connaissent bien, ils savent qu'ils n'ont pas été faciles. Cependant, au gré des rencontres et avec le temps qui passe (vite, malgré tout), on trouve le soleil là où il n'est pas et on se surprend à apprécier le nouveau décor du plat pays. Je me suis retrouvée lancée dans ma nouvelle « vie de chercheuse » presque sans m'en rendre compte, en allant de périodes de doutes en périodes de satisfactions scientifiques et personnelles. Cette réussite est le fruit de nombreuses rencontres que je souhaite remercier ici pour toute l'aide, le soutien, les conseils qu'elles m'ont apportés ou tout simplement pour leur bonne humeur et leur joie de vivre qui ont fait de ces trois années, une aventure incroyable.

Je tiens à remercier les directeurs de cette thèse, Franck Barbier et Mohamed Djemai, pour m'avoir accordée toute votre confiance durant ces années de thèse. J'espère avoir été à la hauteur de vos espérances.

Je remercie Thierry Marie Guerra, directeur du LAMIH pour m'avoir accueillie au sein du laboratoire et avoir partagé quelques passions communes. En repassant du côté du LAMIH je ne manquerai pas de ramener quelques délices du Sud Ouest. Merci également à ses « Drôles de Dames » pour leur réactivité et leur aide précieuse contre la machine administrative universitaire.

Merci aux Professeurs Arnel Créteil, Julien Morlier et DR. Xuguang Wang pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être rapporteurs afin de juger et d'expertiser ce travail. Je remercie également D. Robert Fuchs et Pr. André Thevenon qui m'ont fait l'honneur d'accepter de participer à mon jury en tant qu'examineur de la thèse.

Un grand merci à Philippe Pudlo, pour m'avoir motivée à terminer ce travail de thèse. Tes qualités humaines et professionnelles font de toi un encadrant remarquable. J'ai beaucoup appris à tes côtés d'autant plus que tu as cette capacité à te rendre facilement disponible. J'espère que ton premier management de thésard féminin te laisse un bon souvenir. De mon côté, ces trois années de travail commun m'ont apporté bien plus qu'un doctorat, MERCI !

Je tiens également à remercier Pierre Loslever pour son implication dans l'analyse statistique de la base de données. C'est un beau travail d'équipe qu'on a mené ici. Merci pour tes remarques et pour les connaissances que tu m'as apportées dans le traitement des données. Merci aussi pour ta réactivité et ton efficacité.

Merci également à tous les volontaires ayant participé à l'étude. Sans vous ce travail de recherche n'aurait pu aboutir. Merci au CHRU de Lille, en particulier Séverine et Elise et à Axelle, Babeth, Sabine et Stéphane de la Fondation Hopale de Berck-sur-Mer pour votre aide et votre implication dans le projet lors des campagnes expérimentales.

A votre tour Collègues ! Merci pour vos conseils et votre écoute. Une attention particulière à Super Docky pour ses coups de main précieux et son soutien durant ces 3 ans, à Emilie pour les franches rigolades et les détente sportives, à Christophe pour ses bons plans voitures et son café chaud, à Seb pour sa zénitude et ses blagues presque aussi drôles que les miennes, à Aurore pour ses conseils et ses attentions gourmandes.. Merci aussi à mes ex-collègues, je pense notamment à Nico, Diane et Damien, pour les midis culture G.

Je ne pourrai terminer ses remerciements sans citer les personnes qui me sont chères et sans qui ce travail ne serait pas ce qu'il est aujourd'hui...Anne-Lise, Chticanos, Mimine, Agathe, Lamoule, Polo, mille mercis mes amis pour m'avoir soutenue et encouragée pendant cette période. Copina merci pour tout ! Nos sorties, nos voyages, nos expéditions de Cindy et j'en passe sont des souvenirs intarissables, qui font de cette épopée Ch'timilandaise, une aventure mémorable. Un merci particulier à un petit Monsieur pour avoir été grandement présent lors de cette période de rédaction particulièrement difficile.

Merci aussi Tertous pour tes découvertes alpines Belge et ces bbq dignes d'expéditions de haute montagne.

Mes derniers mots (avant les scientifiques), je les adresse à ma famille : mes parents, mon frerot, mes grands parents, mes coussin(e)s et mes tontons/taties. Merci à vous d'avoir supporté mon éloignement et mon peu de disponibilité au cours de ces trois dernières années.

## Sommaire

<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>19</b>
<b>CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTERATURE</b>	<b>23</b>
<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>24</b>
<b>2. CONDUITE AUTOMOBILE</b>	<b>24</b>
2.1. INFORMATIONS DANS LA TACHE DE CONDUITE	25
2.2. TRAITEMENT DE L'INFORMATION	27
2.3. CONCLUSION	28
<b>3. CAS PARTICULIER DU GESTE DE TOURNER LE VOLANT</b>	<b>28</b>
3.1. POSITION DES MAINS	29
3.1.1. Nomenclature	29
3.1.2. Recommandations	29
3.2. DESCRIPTION ANATOMIQUE DU MEMBRE SUPERIEUR	31
3.2.1. Structure ostéo-articulaire et calcul du centre articulaire	31
3.2.2. Myologie	34
3.3. CONCLUSION	35
<b>4. CAS DE LA CONDUITE ADAPTEE</b>	<b>36</b>
4.1. ETAT DES LIEUX DU PERMIS EN FRANCE	36
4.2. AMENAGEMENTS EXISTANTS	37
4.3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA DIRECTION ASSISTEE (DA)	38
4.4. CONCLUSION	39
<b>5. ETUDES D'ANALYSE DU MOUVEMENT DES MEMBRES SUPERIEURS EN CONDUITE AUTOMOBILE</b>	<b>40</b>
5.1. ETUDES REALISEES A PARTIR DE VIDEOS NUMERIQUES	40
5.2. ETUDES BASEES SUR LA MOTION CAPTURE	42
5.2.1. Principaux résultats	42
5.2.2. Généralités sur les systèmes optoélectroniques	43
5.3. ETUDES ELECTROMYOGRAPHIQUES (EMG)	45
5.4. MESURES AU VOLANT	47
5.5. ETUDES ERGONOMIQUES	49
5.6. CONCLUSION	51
<b>6. SIMULATEURS DE CONDUITE</b>	<b>53</b>
6.1. DIFFERENTS TYPES DE SIMULATEURS	53
6.2. PROBLEMATIQUES DE L'UTILISATION DES SIMULATEURS	56
6.3. CONCLUSION	56
<b>7. ANALYSE DES DONNEES</b>	<b>57</b>
<b>8. CONCLUSION</b>	<b>58</b>

<b>CHAPITRE 2 : PROTOCOLE ET DISPOSITIF EXPERIMENTAL – TRAITEMENT DES DONNEES</b>	<b>77</b>
<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>78</b>
<b>2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET PROTOCOLE</b>	<b>78</b>
2.1. DISPOSITIF EXPERIMENTAL	78
2.1.1. Maquette automobile	79
2.1.2. Volant instrumenté V3B	81
2.1.3. Interface visuelle	83
2.1.4. Caméras Vicon MX T020	87
2.1.5. Système EMG Zerowire	88
2.2. PREMIERES EXPERIMENTATIONS DE VALIDATION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL	89
2.2.1. Protocole des premières expérimentations	89
2.2.2. Validation de l'interface visuelle	94
2.2.3. Validation du V3B	96
2.2.4. Conclusion	99
2.3. PROTOCOLE RETENU POUR L'ANALYSE DU GESTE DE TOURNER LE VOLANT	99
2.3.1. Population	99
2.3.2. Présentation du protocole	102
<b>3. TRAITEMENT DES DONNEES EXPERIMENTALES</b>	<b>108</b>
3.1. LABELLISATION DES MARQUEURS VICON® SOUS NEXUS	109
3.2. CREATION DE REPERES LOCAUX	109
3.2.1. Repère local du volant	110
3.2.2. Repères locaux des membres supérieurs et du tronc du conducteur	111
<b>4. CONCLUSION</b>	<b>115</b>
<b>CHAPITRE 3 : INTERACTION CINEMATIQUE MAIN/VOLANT : METHODE ET RESULTATS</b>	<b>147</b>
<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>148</b>
<b>2. ANALYSE SPATIALE DU MOUVEMENT DES MAINS : LES DENSITOGRAMMES</b>	<b>148</b>
2.1. METHODE	148
2.1.1. Positions des mains dans le plan de volant	148
2.1.2. Représentation en densitogrammes	149
2.1.3. Indicateur numérique <i>In</i> pour définir les profils	150
2.1.4. Statistiques	151
2.2. RESULTATS	151
2.2.1. Densitogrammes	151
2.2.2. Indicateur numérique	155
2.3. DISCUSSION	157
2.4. CONCLUSION	158
<b>3. ANALYSE SPATIALE DE LA POSE DES MAINS</b>	<b>158</b>



3.1.	DECOUPAGE DU VOLANT	158
3.2.	DEFINITION DU DECOUPAGE EN SOUS ENSEMBLE FLOU	159
3.3.	CALCUL DE LA POSITION ANGULAIRE DE LA MAIN SUR LE VOLANT	161
3.4.	DECOUPAGE DES FONCTIONS D'APPARTENANCE	162
3.5.	METHODE D'ANALYSE : L'ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES MULTIPLES (AFCM)	164
3.5.1.	Analyse des résultats	165
3.6.	CONCLUSION	171
<b>4.</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>171</b>

**CHAPITRE 4 : VARIABLES CINEMATIQUES ET DYNAMIQUES : METHODE ET RESULTATS** **177**

<b>1.</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>178</b>
<b>2.</b>	<b>CREATION DE LA BASE DE DONNEES</b>	<b>178</b>
2.1.	MODELISATION CINEMATIQUE DU MEMBRE SUPERIEUR	178
2.2.	ANGLES ARTICULAIRES	179
2.2.1.	Procédure de calcul	179
2.3.	EFFORTS DEVELOPPES PAR CHAQUE MAIN SUR LE VOLANT	181
2.4.	EFFORTS INTERARTICULAIRES	183
2.4.1.	Hypothèses	183
2.4.2.	Calcul des efforts interarticulaires	184
2.4.3.	Efforts interarticulaires chez le conducteur en 3D	185
2.5.	CONCLUSION	186
<b>3.</b>	<b>ANALYSE DE LA BASE DE DONNEES</b>	<b>188</b>
3.1.	INTRODUCTION	188
3.2.	ANALYSE ATEMPORELLE	188
3.2.1.	Nomenclature des variables	189
3.2.2.	Découpage en fenêtres floues	189
3.2.3.	Résultats	191
3.2.4.	Conclusion	195
3.3.	ANALYSE TEMPORELLE	195
3.3.1.	Découpage temporel des virages	196
3.3.2.	Résultats	196
3.3.3.	Conclusion	200
<b>4.</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>200</b>

<b>CHAPITRE 5 : SYNTHÈSE DES RESULTATS ET PERSPECTIVES DE RECHERCHES</b>	<b>219</b>
<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>220</b>
<b>2. SYNTHÈSE DU TRAVAIL DE THESE</b>	<b>220</b>
<b>3. PERSPECTIVES</b>	<b>222</b>
3.1. A COURT TERME	222
3.2. A MOYEN TERME	223
3.3. A LONG TERME	223
<b>4. CONCLUSION</b>	<b>225</b>
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>227</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>233</b>

## Table des Figures

Fig. 1: Modèle de contrôle latéral orienté par 2 points : le rond représente le point proche et la croix le point lointain. Dans un virage, le point lointain peut être le point tangent du virage ou bien un véhicule déjà engagé dans le virage. (Salvucci and Gray, 2004).....	25
Fig. 2: Les trois niveaux de la tâche de conduite selon Michon (1985).....	28
Fig. 3 : Exemple de position de la main en référence au cadran horaire, en rouge la position des mains, main gauche à 10h et mains droite à 2h, soit la position des mains 10h et 2h. ....	29
Fig. 4: a/ Placement des mains lors d'un tourner le volant une main après l'autre et b/ une main au dessus de l'autre lors d'une manœuvre à basse vitesse (source : NHTSA).....	30
Fig. 5: Tourner le volant à une main lors d'une marche arrière (source : NHTSA).....	31
Fig. 6: Articulations de l'épaule.....	32
Fig. 7 : A gauche, vue antérieure de l'articulation du coude droit et à droite, vue postérieure de l'articulation du coude droit. Le centre articulaire est représenté par la croix rouge.....	33
Fig. 8 : Description du mouvement de flexion/extension et de prono/supination du coude.....	33
Fig. 9 : Description du mouvement de flexion/extension et d'abduction/adduction du poignet. ....	34
Fig. 10 : Articulation du poignet, le centre articulaire est représenté par la croix rouge.....	34
Fig. 11: Les systèmes d'aide à la direction. ....	37
Fig. 12: Principe de la direction d'un véhicule léger.....	38
Fig. 13 : Exemple de cartographie par Volkswagen of America Inc (2004).....	39
Fig. 14: Analyse de la position des mains par Walton et Thomas en 2005.....	41
Fig. 15: Taux d'occupation de a/ la main gauche et de b/ la main droite, en situation de précrash (Hault-Dubrulle, Robache et al., 2010). ....	41
Fig. 16: Exemples d'images de tracking de la position des mains pendant la conduite (McAllister, McKenna et al. 2002), de gauche à droite et de haut en bas : mains parallèles, mains serrées, mains croisées et mains parallèle.....	42
Fig. 17 : Différence d'amplitude de l'angle de flexion du coude, pendant une tâche de tourner le volant entre les sujets sains (N-BR), sujets sains contraints (BR) et sujets prothésés (PROS) (Carey, Highsmith et al. 2008).....	43
Fig. 18: Vue des couples inter articulaires et des forces au volant exercées par le bras droit (Pick et Cole 2006 (a)).....	46
Fig. 19 : Principaux muscles impliqués dans la tâche de tourner le volant droit (Pick et Cole 2006 (a)). ....	47

Fig. 20 : Exemple d'instrumentation du volant et du siège conducteur dans l'étude de Hault-Dubrulle, Robache et al. 2010. ....	48
Fig. 21: Composante fréquentielle de l'angle au volant (Isomura, Hara et al. 1995). ....	48
Fig. 22 : De bas en haut, courbes de co-contraction, couple et angle au volant, moyennés sur 10 sur manœuvres de changement de voie, pour un sujet (Pick et Cole, 2006 (a)).....	49
Fig. 23 : Etude de Chien (2006) sur trois designs de volant différent. ....	50
Fig. 24 : Exemple de simulateur de table (Laab Sim, Jamson and Jamson (2010)).....	54
Fig. 25 : Exemples de simulateurs compacts, à gauche le simulateur Faros <sup>®</sup> utilisé par Hétier 2008 et à droite le simulateur Oktal.....	55
Fig. 26: Exemples de simulateurs dynamiques, de gauche à droite : Sherpa (LAMIH, UVHC), Ultimate (Renault) et TUDS (Tongji University Driving Simulator, Shanghai).....	55
Fig. 27 : Axes de références de Williams et al. (1992) cités dans Allard and Blanchi (2000). ....	60
Fig. 28: Moelle épinière et niveau de lésion.....	64
Fig. 29: Schéma d'un motoneurone. ....	66
Fig. 30: Evolution de la PR. ....	69
Fig. 31: Exemple de polyarthrite rhumatoïde de la main. ....	70
Fig. 32 : Instrumentation d'un sujet lors d'un geste de tourner le volant (Balasubramanian & Adalarasu, 2007).....	72
Fig. 33 : Exemple du pic d'activation de l'EMG (en V) par rapport à l'angle au volant (en °). ....	72
Fig. 34: Un point intéressant des méthodes factorielles : possibilité de considérer des points mis en « supplémentaire » (ou « en illustratif). Le cas montré ici concerne les points-lignes.....	75
Fig. 35 : Maquette automobile compacte sur son châssis métallique.....	79
Fig. 36 : a/ Aménagement du compartiment moteur de la maquette et b/ habitacle d'origine de la 206 .....	79
Fig. 37 : Maquette sur châssis escamotable, en position de transport, vue de profil à gauche et vue de face ci-dessus.....	80
Fig. 38 : A gauche, montage de la ½ steer-by-wire, à droite la ½ steer-by-wire démontée .....	80
Fig. 39 : Position des marqueurs sur la maquette (en rouge) et sur le volant (en blanc).....	81
Fig. 40: Le volant d'origine est découpé en trois. Chaque tiers est fixé à un dynamomètre à 6 composantes, avec G pour Gauche, D pour Droite et M pour Milieu (Gabrielli, Pudlo et al. 2012 (a)). .....	82
Fig. 41 : Le volant instrumenté V3B: a/ avec le cache Peugeot du volant d'origine et b/ sans le cache. .....	82
Fig. 42 : Le volant d'origine VO à gauche et le volant instrumenté V3B à droite.....	83

## Table des Figures

Fig. 43 : Véhicule hybride du LAMIH (haut droit), vue aérienne du campus (à gauche), parcours réalisé (bas droit).....	84
Fig. 44: Virage projeté :a) à gauche, le curseur vert suit la trajectoire, b) à droite, le curseur devient rouge en s'éloignant de la trajectoire.....	86
Fig. 45 : Disposition des 10 caméras autour de la maquette automobile .....	87
Fig. 46: Baguette de calibration des caméras Vicon® .....	88
Fig. 47: Système EMG Zerowire, AURION .....	88
Fig. 48 : Déroulement du protocole, avec $i = 1$ le volant d'origine VO (respectivement V3B) avec $i=2$ le volant V3B (respectivement VO) et $s$ le n° de scénario (S1 ou S2) .....	90
Fig. 49: Test d'apprentissage simulation de créneau .....	91
Fig. 50: a/ Configuration de d'angle au volant simple à droite et b/ droite / gauche .....	91
Fig. 51: a/ Configuration d'angle au volant de type petit giratoire et b/ gauche / droite.....	91
Fig. 52: a/ Configuration d'angle au volant de type droite-gauche et b/ droite-gauche-droite de grande amplitude.....	92
Fig. 53 : Plan d'expérience avec $N$ = nombre de sujets et $i$ = numéro de répétition de l'enchaînement des scénarios 1 (S1) et 2 (S2), Q1 le questionnaire avec l'ordre de question n°1, Q2 le questionnaire avec l'ordre de question n°2, VO le volant d'origine et V3B le volant 3 branches.....	92
Fig. 54 : Un sujet dans la maquette durant l'expérimentation .....	93
Fig. 55: Représentation de l'angle au volant pour le virage n°10: en pointillé l'angle demandé, en vert, l'angle réalisé. Score de performance total du scénario : 95,6% .....	95
Fig. 56 : Stratégies de conduites différentes pour un même virage (virage 6 : 400° à droite). .....	96
Fig. 57 : Découpage du volant en 4 zones.....	96
Fig. 58 : Repère du dynamomètre central .....	98
Fig. 59: Bilan du nombre de sujets exploitables.....	102
Fig. 60 : Les étapes du protocole expérimental avec $i = nb$ de répétitions.....	103
Fig. 61: Positions des marqueurs sur le sujet, en rouge, les marqueurs positionnés au début de l'expérimentation, en bleu les marqueurs rajoutés pour le sphere fitting.....	104
Fig. 62: Emplacement des électrodes EMG pour le membre supérieur droit.....	105
Fig. 63: Sujet équipé des marqueurs Vicon et des électrodes EMG.....	106
Fig. 64: Prise de mesure statique du sujet .....	106
Fig. 65: Positions des mains lors des tests isométriques .....	107
Fig. 66: Interface visuelle des tests isométriques. En rouge la position où la main doit être positionnée, la flèche noire indiquant le sens d'application de la force sur le volant.....	107
Fig. 67: Dépouillement Vicon d'un sujet.....	109

## Table des Figures

Fig. 68: Trajectoires des 3 marqueurs du volant .....	110
Fig. 69: Repère volant à partir de la trajectoire des marqueurs sur le volant .....	111
Fig. 70 : Représentation du repère au volant $Rv$ .....	111
Fig. 71: Nombre de fois où la zone bleue est touchée pour les trois groupes .....	125
Fig. 72 : Nombre de fois où la zone verte est touchée pour les trois groupes .....	126
Fig. 73 : Moyenne et écart type a) entre $ EM(t) $ et $ EMRt1(t>0) $ , $ EMRt2(t>0) $ et $ EMRt3(t>0) $ et b) sur le calcul d'angle $f/e$ à partir de EM mesuré et EM estimé.....	145
Fig. 74 : Déplacement de la main gauche et droite dans le plan du volant pour un sujet pendant un scénario.....	149
Fig. 75: Principe de construction du densitogramme .....	150
Fig. 76: Description d'un profil croiseur dans un virage simple droite 90. La main marquée d'un point noir est celle qui reste sur le volant. Les flèches pleines montrent le déplacement de la main droite et les flèches en pointillés, le déplacement de la main gauche. La courbe bleue indique l'angle au volant du virage.....	153
Fig. 77 : Description d'un profil non croiseur dans un virage simple droite 90. La main marquée d'un point noir est celle qui reste sur le volant. Les flèches pleines montrent le déplacement de la main droite et les flèches en pointillés, le déplacement de la main gauche. La courbe bleue indique l'angle au volant du virage. ....	154
Fig. 78 : Description d'un profil croiseur asymétrique dans un virage simple droite 90. La main marquée d'un point noir est celle qui reste sur le volant. Les flèches pleines montrent le déplacement de la main droite et les flèches en pointillés, le déplacement de la main gauche. La courbe bleue indique l'angle au volant du virage. ....	154
Fig. 79 : Moyenne et écart type a/ des $\%Md \rightarrow g$ et b/ $\%Mg \rightarrow d$ pour tous les sujets dans les 6 scénarii. ....	155
Fig. 80: Répartition des différents profils chez les conducteurs sains participant à l'étude.....	157
Fig. 81 : Découpage du volant.....	159
Fig. 82 : Exemple de a/ position de la main gauche à un instant t dans un virage b/position de la main gauche au même instant t dans le même virage de deux scénarii différents : la main est « à peu près » au même endroit, la pose de main est-elle répétable ? .....	159
Fig. 83: Définition floue d'une population jeune, avec en ordonnée $\mu_{jeune}$ la valeur d'appartenance à la population « jeune » et en abscisse, l'âge.....	160
Fig. 84 : Découpage floue avec trois modalités: "jeune", "la quarantaine", "sénior", avec $\mu(x)$ la valeur d'appartenance à une modalité.....	160
Fig. 85 : Position de la main dans le plan du volant.....	162
Fig. 86 : a) Découpage du volant b) fonction d'appartenance de la position des mains droite et gauche dans l'exemple. ....	163

Fig. 87 : AFCM sans interaction des 2 mains pour les 9 modalités. Lorsque le grand axe du losange est parallèle à l'axe 1 (resp. axe 2) alors la variable est discriminante sur cet axe. Le grand axe du losange correspond à la contribution de la modalité par rapport à l'axe du plan factoriel avec lequel il est parallèle. ....	165
Fig. 88 : Représentation graphique du taux d'occupation des modalités du volant pour 2 conducteurs et sur la moyenne des virages. Les histogrammes rouges représentent le taux d'occupation moyen de la modalité (lettre en minuscule) pour la main gauche et les histogrammes bleus représentent le taux d'occupation de la modalité (lettre en majuscule) pour la main droite, sur l'ensemble des virages. Les histogrammes dessinés hors du cercle correspondent à la modalité « main hors du volant ». ....	166
Fig. 89 : Représentation graphique du taux d'occupation moyen des modalités du volant pour le conducteur ECat dans les virages 2 et 6. ....	167
Fig. 90 : A gauche projection du profil moyen des 20 conducteurs (I=20), au centre projection des 7 virages (J=7) et à droite projection des 6 répétitions (K=6). ....	167
Fig. 91 : AFCM avec interaction droite/gauche pour les 9x9 modalités. Lorsque le grand axe du losange est parallèle à l'axe 1 alors la variable est discriminante. Le grand axe du losange correspond à la contribution de la modalité par rapport à l'axe du plan factoriel avec lequel il est parallèle. ....	169
Fig. 92 : A gauche projection du profil moyen des 20 conducteurs (I=20), au centre projection des 7 virages (J=7) et à droite projection des 6 répétitions (K=6). ....	170
Fig. 93 : Représentation graphique des interactions main droite/main gauche. Les flèches pleines sont les relations principales, les flèches en pointillés sont les relations peu utilisées. ....	170
Fig. 94 : Données brutes des sujets Ysag et Tsai dans la répétition 1 du virage 1. ....	174
Fig. 95 : Données brutes du sujet Ecat dans les virages 2 (à gauche) et 6 (à droite). ....	175
Fig. 96: Modélisation cinématique du membre supérieur du conducteur. ....	179
Fig. 97: Repère volant $v_0$ à $t=0$ (en noir) et repère volant $v_\theta$ (en rouge) après une rotation d'angle $\theta$ du volant autour de l'axe Z. ....	182
Fig. 98: Schéma récapitulatif des données d'entrée et de sortie de la dynamique inverse. ....	186
Fig. 99 : Principe de découpage de la plage de variation d'un signal multidimensionnel, a/ cas d'une composante présentant des variations de part et d'autre du zéro b/ cas d'une composante restant toujours positive (ou négative) (Loslever and Bouilland 2003). ....	190
Fig. 100 : a) Découpage du volant (la modalité « présence de la main sur le volant » n'est pas montrée mais elle est considérée) et b) exemple des positions des mains et des valeurs d'appartenance aux modalités. ....	191
Fig. 101 : Orientation des repères utilisés. ....	192
Fig. 102 : Histogramme représentant la sollicitation des modalités p/- (en noir), m/= (en gris foncé) et G/+ (en gris clair) pour 2 conducteurs fortement différenciés par l'AFCM. ....	192
Fig. 103 : Couple résultant moyen à l'épaule droite pour tous les sujets. ....	193

Fig. 104 : Résultats de l'AFCM, pour les sujet ACat et CSan, sur le tableau 20*6 (les lignes sont placées en « supplémentaires », cf. fig. 34 du Chap. 1 annexe 5).....	194
Fig. 105 : Résultats de l'AFCM, pour les sujets ACat et CSan, sur le tableau 20*7 (les lignes sont placées en « supplémentaires », cf. fig. 34 du Chap. 1 annexe 5).....	194
Fig. 106 : Exemple de découpages temporel en T fenêtres de 1s, sur un virage.....	196
Fig. 107 : Résultats de l'AFCM pour le conducteur ACat sur la répétition 1 du virage 1 et 2. A gauche les signaux en bleu correspondant à des variables ayant joué un rôle important dans l'AFCM (le signal en noir rappelle l'angle au volant).....	198
Fig. 108 : Résultats de l'AFCM pour le conducteur CSan sur la répétition 1 du virage 1 et 2. A gauche les signaux en bleu correspondant à des variables ayant joué un rôle important dans l'AFCM (le signal en noir rappelle l'angle au volant).....	199
Fig. 109 : Evolution de la force résultante $FR$ (en pointillé noir) par rapport à la force $HFzR$ normale au plan du volant (en gris), pour la 1ère répétition du 1er virage pour Acat à gauche et Csan à droite. ....	200
Fig. 110 : Mise en forme des données pour l'étude atemporelle. ....	203
Fig. 111 : Plan factoriel de l'AFCM sur le tableau $Y2_{JK}$ avec $I*J*K$ lignes et $93*3+2*4=287$ colonnes. ....	204
Fig. 112 : Mise en forme des données pour l'analyse temporelle.....	205
Fig. 113 : Plan factoriel de l'AFCM sur le tableau $Y3_{JKT}$ avec $I*J*K*T$ lignes et $93*3+2*4=287$ colonnes.....	205
Fig. 114 : Histogramme de la variables $EpR$ à gauche et de la variable $HFzR$ à droite. En dessous, découpage flou proposé selon l'étendue des valeurs : en vert les fenêtres triangulaires représentant 99% des données, en rouge les fenêtres trapézoïdes pour les valeurs extrémales.....	210
Fig. 115 : Synthèse de l'étude .....	222
Fig. 116 : a/ Angles au volant réalisé par un conducteur sain (pointillé) et par un conducteur avec déficiences (trait plein) pour un virage. b/ spectre fréquentiel de l'angle au volant pour le conducteur sain (pointillés) et le conducteur avec déficiences (trait plein) dans le même virage. ....	224



---

## Table des Tableaux

Tableau 1: Amplitudes articulaires de l'épaule chez le sujet sain (Kapandji, 1974). .....	32
Tableau 2 : Actions et plan des principaux muscles du membre supérieur.....	35
Tableau 3 : Nombre de permis distribués en France en 2011 (Source : INSEE) .....	36
Tableau 4 : Tableau récapitulatif des principaux résultats des études sur la tâche de conduite. ....	52
Tableau 5 : Bilan avantages/inconvénients de l'utilisation de simulateurs de conduite. ....	57
Tableau 6 : Principaux muscles de l'épaule.....	61
Tableau 7 : Principaux muscles du bras. ....	62
Tableau 8 : Principaux muscles de l'avant-bras.....	63
Tableau 9 : Base de données des 10 virages retenus. ....	84
Tableau 10: Positions angulaires du volant et leurs représentations graphiques.....	86
Tableau 11 : Moyenne et écart-type des scores de performance .....	94
Tableau 12 : Résultats statistiques des comparaisons des scores de performance entre les groupes sain, âgé et avec pathologie .....	95
Tableau 13: Extrait de grille d'observation, à gauche et images vidéo correspondantes à droite.....	97
Tableau 14 : Résultats de l'Anova pour les 2 items qui induisent des différences entre les volants .....	99
Tableau 15. Seuil d'inclusion pour le membre supérieur. ....	100
Tableau 16. Caractéristiques générales de la population, moyenne (écart-type). ....	102
Tableau 17 : Exemple de représentation en densitogramme des trois profils existant dans la population de conducteurs sains (de 0 pas de passage de la main dans une case à 60 nombre de passage max. dans une case).....	152
Tableau 18: Valeurs de %Md→g et %Mg→d pour tous les sujets sur le scénario 3.....	156
Tableau 19 : Exemple de différence entre le calcul d'une moyenne arithmétique et d'une valeur d'appartenance moyenne.....	161
Tableau 20 : Tableau des valeurs d'appartenance de l'exemple figure 86a. ....	163
Tableau 21: Séquence de rotations pour le calcul des angles.....	180
Tableau 22 : Table anthropométrique définie par De Leva (1996). ....	186
Tableau 23: Tableau récapitulatifs des variables étudiées.....	187



---

## **INTRODUCTION GENERALE**

---

Dans la société actuelle, l'autonomie des personnes vieillissantes et/ou à mobilité réduite est devenue une priorité économique. Les infrastructures publiques ainsi que les transports en commun sont soumis à des normes favorisant l'accès et l'autonomie de ces personnes. La lutte contre l'isolement, l'accessibilité en tous lieux, la possibilité de se représenter soi-même dans les instances, et la maîtrise de ses propres projets, sont les thèmes les plus fréquemment réclamés par les personnes à mobilité réduite. Ce besoin de mobilité est d'ailleurs recensé comme l'un des 5 besoins fondamentaux exprimés par la personne âgée et/ou handicapée dans le rapport ALCIMED (Etude Prospective sur les Technologies pour la Santé et l'Autonomie, étude effectuée à la demande de l'Agence Nationale de la Recherche et de la Caisse Nationale de Solidarité pour l'Autonomie, Octobre 2007).

En matière d'autonomie, l'automobile est aujourd'hui un moyen de transport démocratisé. L'étude publiée par le service Economie, Statistiques et Prospective (SESP) du ministère de l'environnement (CGDD 2011)<sup>1</sup> montre que la voiture est le moyen de transport privilégié en France. Or pour conduire, les ressources exigées sont nombreuses : grande mobilité des bras et de la tête, force musculaire suffisante pour embrayer ou tourner le volant, bonne vigilance et bonne vision, etc. La vieillesse ou le handicap sont susceptibles de réduire fortement les capacités motrices et cognitives du conducteur. Ces limitations peuvent l'inciter à abandonner la conduite automobile et donc une grande part de son autonomie.

Malgré les aides à la conduite disponibles sur le marché (boîte automatique, boule de direction, etc.), la tâche de tourner le volant reste un des points critiques de la conduite automobile. Elle requiert une amplitude suffisante dans le mouvement ainsi qu'une force minimale. Les personnes à mobilité réduite sont confrontées à des difficultés pour manipuler le volant dans le secteur supérieur liées, 1) à la nécessité de lutter contre la pesanteur du bras dans ce secteur, 2) aux limitations de leurs amplitudes articulaires. Ces difficultés entraînent une fatigue excessive qui peut alors rendre difficile le contrôle du véhicule.

Actuellement, les directions assistées sont réglées à partir du ressenti des conducteurs sains, sans déficiences motrices des membres supérieurs. Des sur-assistances existent pour les conducteurs avec des déficiences physiques mais leurs réglages n'est pas spécifiquement adaptés aux capacités articulaires (rhumatismes divers), musculaires (diminution de force, sénescence), ou encore aux douleurs ressenties par le conducteur pathologique. Dans le but de développer des directions assistées spécifiquement adaptées aux personnes ayant des déficiences au niveau des membres supérieurs pendant une situation de conduite à basse vitesse, une première étape est de comprendre le geste de tourner le volant.

Ce constat a donné lieu au projet ANR VTT VolHand. L'objectif de ce projet est de mettre au point une direction assistée dite intelligente, qui s'adapterait aux personnes âgées et ou handicapées. Ce projet regroupe les laboratoires de recherche de l'IFSTAAR, du GIPSA LAB et du LAMIH, les centres de rééducation fonctionnelle de Berck-sur-Mer (Centre Calvé de la Fondation Hopale) et du CHRU de Lille (Hôpital Zwynghedauw) et un partenaire industriel, leader mondial dans le secteur des directions assistées automobiles : JTEKT. Cette thèse fait partie intégrante de ce projet.

---

<sup>1</sup> Commissariat Général au Développement Durable. (<http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/>)

Son objectif est de réaliser une étude biomécanique multi variables du geste de tourner le volant chez le sujet sans déficiences motrices. La connaissance de ce geste est indispensable pour un réglage adapté de la direction assistée électrique. Il a été décidé de borner l'étude à la conduite à basse vitesse (i.e. parking) car elle engendre des mouvements de grandes amplitudes qui peuvent rendre le geste de tourner le volant difficile. Dans la présente thèse, des analyses cinématique et dynamique du geste de tourner sont réalisées.

Cette thèse se décline en cinq chapitres :

Le premier chapitre réalise l'état de l'art. Il définit la conduite automobile dans sa globalité et met en évidence l'important de la mobilité du membre supérieur lors de la conduite. Les outils de mesure et d'analyse des données sont présentés. Les faiblesses de la littérature par rapport à l'analyse du geste de tourner le volant sont identifiées. Ce chapitre montre l'intérêt d'étudier l'interaction cinématique main/volant et de mener une étude biomécanique multi variables pour créer un profil de référence du geste de tourner le volant, chez le sujet sain.

Le deuxième chapitre présente le protocole expérimental et les outils de mesures utilisés pour acquérir les données cinématiques des membres supérieurs et les efforts appliqués sur le volant chez le conducteur automobile pendant une situation de manœuvres à basse vitesse. Le traitement Vicon et la création des repères locaux sont présentés.

Le troisième chapitre présente l'étude de l'interaction cinématique main/volant pour mettre en évidence différents profils de conducteurs. Cette analyse est réalisée en deux étapes : une analyse en densitogramme du déplacement des mains sur le volant et une analyse de la pose des mains au travers un découpage flou du volant et une analyse factorielle des composantes multiples (AFCM).

Le quatrième chapitre réalise l'analyse biomécanique multi variables du geste de tourner le volant. L'objectif de ce chapitre est d'identifier les variables pertinentes du geste de tourner le volant. Ces variables permettent de différencier les conducteurs. Les variables cinématiques ainsi que les variables dynamiques mesurées et calculées sont détaillées. Les variables discriminantes sont recherchées à partir d'une AFCM.

Le cinquième chapitre revient sur les résultats obtenus et propose quelques perspectives de recherches.



---

**CHAPITRE 1**  
**REVUE DE LITTERATURE**

---

## 1. Introduction

Ce chapitre réalise l'état de l'art. Dans une première partie l'activité de conduite automobile est présentée. Les informations nécessaires à la réalisation de cette tâche, ainsi que leurs traitements, sont précisées. Dans une deuxième partie, les ressources motrices nécessaires au geste de tourner le volant sont mises en évidence. La grande mobilité des mains sur le volant et des membres supérieurs pour tourner le volant est soulignée. Pour autant, la conduite est accessible à tous, du moins tant que le conducteur y est autorisé. La troisième partie présente la réglementation du permis de conduire. Des aménagements spécifiques du véhicule automobile existent et autorisent certaines personnes atteintes de déficiences motrices à conduire. La quatrième partie présente ces aménagements : anneau ou manche accélérateur/frein, boule, fourche, etc. Une attention particulière est portée sur les systèmes de directions assistées. Le réglage de ce type de système est encore principalement conçu pour des sujets sains<sup>2</sup> et les sur-assistances existantes restent peu adaptées aux personnes ayant des déficiences du membre supérieur. Une bonne connaissance du geste de tourner le volant, déjà chez le sujet sain, apparaît alors nécessaire pour proposer dans le futur une assistance à la direction adaptée aux déficiences motrices. La cinquième partie de ce chapitre présente les études visant l'analyse du geste de conduite. Si elles ne répondent pas à notre problématique, elles ont l'avantage de mettre en évidence les données nécessaires à l'analyse multi variables du geste de tourner le volant lors de manœuvres à basse vitesse. Dans ce cadre, l'expérimentation sur l'être humain en situation est nécessaire. La sixième partie présente les simulateurs de conduite utilisables : simulateur de table, simulateur compact ou encore simulateur dynamique. Enfin, la dernière partie de ce chapitre cible l'analyse des données, et met l'accent sur les méthodes d'analyse lorsque les variables à étudier sont hétérogènes et nombreuses.

## 2. Entrées sensorielles utilisées en conduite automobile

La conduite automobile est une activité de contrôle de processus reposant sur les capacités motrices et perceptives du conducteur (Bailly 2004). Pour s'adapter à son environnement dynamique, le conducteur doit évaluer en permanence la situation pour prévoir ses futures manœuvres. Elle implique simultanément la réalisation de plusieurs tâches : contrôle longitudinal et latéral du véhicule, gestion des instruments de bord et analyse de l'environnement routier. En définitive, pour conduire des capacités d'attention, de mémoire et de motricité sont nécessaires (Cassavaugh and Kramer 2009).

Cette première partie présente les étapes cognitives de la conduite, de la perception de la tâche à l'exécution du geste. Tout d'abord, les différents types d'informations utilisées par le conducteur sont détaillés. Il y a trois sources principales d'informations pour gérer la trajectoire du véhicule : la vision, l'audition et les informations de proprioception regroupant les informations haptiques et vestibulaires (Kemeny and Panerai 2003). A partir de ces informations, le processus de décision est engagé. Il est décrit dans la deuxième partie.

---

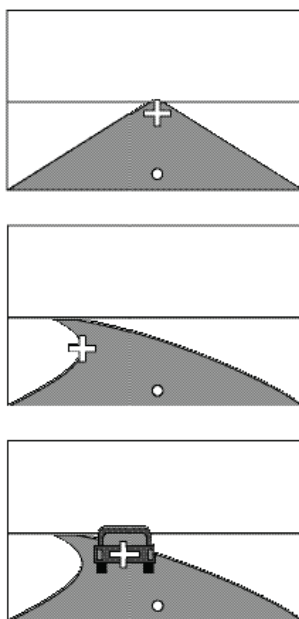
<sup>2</sup> Sans déficiences motrices des membres supérieurs.



## 2.1. Informations dans la tâche de conduite

### - La vision

La vision est une modalité sensorielle<sup>3</sup> prépondérante dans notre vie quotidienne. Elle peut être divisée en deux types : la vision centrale et la vision périphérique. La vision centrale se limite à une zone restreinte du champ de vision. Elle est utilisée principalement pour les activités qui demandent une certaine précision (ex : la lecture). La vision périphérique balaye un champ de vision plus large et permet la distinction des mouvements. Ces deux types de vision sont complémentaires. Ainsi un objet dans l'espace est détecté en vision périphérique et peut être analysé plus précisément avec la vision centrale. En conduite automobile, la vision occupe une place centrale. Elle permet de mener les activités de guidage du véhicule (Summala, Nieminen et al. 1996). De nombreux auteurs, par exemple (Boer 1996; Mars 2006), s'intéressent à la perception visuelle de la tâche puis à son exploitation pour le contrôle latéral du véhicule, lors d'un virage. Salvucci and Gray (2004) ont montré l'importance du repérage sur la route, d'un point proche (7-8m) pour le positionnement sur la voie et d'un point lointain (10-20m) permettant l'anticipation (Fig. 1). Le comportement des conducteurs dépend du transfert entre les entrées perceptives (vision, audition, ...) et les sorties motrices (Weir and Chao 2005) : la coordination informations visuelles/action des mains sur le volant est prépondérante pour contrôler la trajectoire du véhicule, comme elle l'est dans une tâche de tracking où le sujet gère un conflit vitesse/précision (Temprado and Montagne 2001).



**Fig. 1: Modèle de contrôle latéral orienté par 2 points : le rond représente le point proche et la croix le point lointain. Dans un virage, le point lointain peut être le point tangent du virage ou bien un véhicule déjà engagé dans le virage. (Salvucci and Gray, 2004).**

<sup>3</sup> Les sensibilités téléceptives c.-à-d. liées à des stimuli dont la source peut être éloignée, sont : la vision, l'odorat, l'audition, le goût et le toucher. La sensibilité proprioceptive renseigne l'organisme sur la position de la tête dans l'espace. A ces sensibilités sont associés des sensibilités « générales » regroupant des sensibilités extéroceptives (sensibilité cutanée) et proprioceptives (sensibilité de l'organisme).

- L'audition

L'audition est la capacité à entendre des sons. Elle est permise grâce à l'ouïe. En conduite automobile, c'est la modalité sensorielle la plus sollicitée après la vision. Elle offre au conducteur une information sur l'environnement mais également sur le véhicule. En effet, lorsqu'un bruit paraît anormal, le conducteur assimile cette information à un mauvais fonctionnement de son automobile. La présence d'avertisseurs sonores donne des informations auditives aux autres conducteurs. Par exemple sur la route, lors d'un virage serré qui empêche la visibilité sur l'autre voie, les véhicules utilisent l'avertisseur sonore avant de se croiser. Ainsi, les véhicules adaptent leur vitesse à la situation. En ville, l'avertisseur sonore est utilisé pour prévenir d'un danger qui ne semble pas avoir été pris en compte.

De plus, le bruit généré par le moteur du véhicule participe à l'activité de guidage. Par exemple, des études ont montré que l'absence d'informations auditives sur simulateur de conduite peut entraîner une augmentation de la vitesse moyenne de conduite (McLane and Wierwille 1975). Pour éviter ce problème la vitesse peut être imposée. Le bruit permet également d'estimer la vitesse d'un véhicule. En effet Matthews and Cousins (1980) montrent que les conducteurs de petites voitures ont une meilleure capacité à estimer leur vitesse par rapport aux conducteurs de grosses voitures mieux insonorisées.

- Les informations de proprioception

Elles regroupent les informations haptiques et vestibulaires.

*Les informations haptiques* : La perception haptique se différencie de la perception cutanée de par la mise en jeu des récepteurs musculo-tendineux et articulaires. Elle comprend donc, en plus des informations tactiles (déformation de la peau), les activités musculaires tendineuses et articulaires (informations kinesthésiques). Ces informations sont très présentes en conduite automobile (Stoffregen and Bardy 2001; Treffner, Barrett et al. 2002 (a)). Par exemple quand le conducteur décide d'actionner la pédale de frein, il reçoit : des informations tactiles (contact pied/pédale) et des informations kinesthésiques sur la force exercée pendant le freinage et la position angulaire des segments concernés. De la même manière, lorsque les conducteurs tournent leur volant, ils disposent d'informations tactiles (contact main/volant) et d'informations kinesthésiques fournies par les muscles, tendons et articulations impliqués dans ces mouvements. Les informations haptiques jouent un grand rôle dans le contrôle du véhicule (Treffner, Barrett et al. 2002 (b)). Pour étudier un geste de tourner le volant réaliste, il est donc important de simuler un retour d'informations (simulation du contact pneu/chaussée) lors de tests sur simulateur.

*Les informations vestibulaires* : Pour la perception des mouvements de soi (proprioception) et le contrôle de la posture, l'homme fait appel à son système musculaire, musculo-articulaire et surtout vestibulaire. Dans l'oreille interne, des organes vestibulaires (otolithes et canaux semi-circulaires), responsables de la perception des mouvements linéaires et des mouvements rotationnels sont juxtaposés au système auditif. Les sensations d'accélération latérale ou longitudinale, ressenties par le conducteur dans les virages ou lors des accélérations ou des freinages sont détectées par les organes vestibulaires (Boff and Lincoln 1988). La reproduction de ces informations par les plateformes

dynamiques des simulateurs de conduite doit être liée à l'interface visuelle projetée au conducteur pour ne pas entraîner une modification de la perception de l'horizon : une désynchronisation du visuel et de mouvement de l'engin entraîne des conflits visuo-vestibulaires (Kemeny and Panerai 2003).

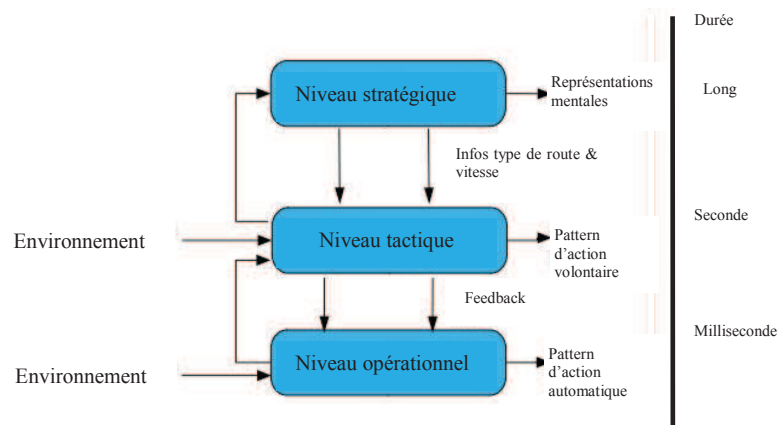
- Conclusion

La vision, l'audition, les informations haptiques et vestibulaires sont des informations nécessaires pour gérer la trajectoire du véhicule et assurer la sécurité du conducteur lors d'une tâche de conduite. La nature et le nombre d'informations perçues par le conducteur nécessitent un traitement pour prendre une décision.

## 2.2. Traitement de l'information

La cognition peut être définie comme la mise en place de processus mentaux pour gérer une activité (Lemaire 2006). Ces processus dépendent de la tâche et des capacités du conducteur (Naatanen and Summala 1974). En fonction de la tâche à réaliser, l'architecture cognitive distingue différents niveaux de traitement de l'information. Selon le modèle d'Atkinson and Shiffrin (1968), les informations passent dans un premier temps dans la mémoire à court terme avant d'être stockées dans la mémoire à long terme. La prise en compte de l'aspect cognitif dans la conduite automobile apparaît dans les années 70-80 avec le développement des études sur les accidents et la sécurité routière (Van Der Molen and Bötticher 1988), (Fuller 1984). Ces travaux se basent sur une hiérarchisation de l'activité de conduite en trois niveaux, proposée par Michon (1985) (Fig. 2):

- le niveau stratégique qui prend en compte les tâches de planification de la conduite et de la programmation de l'itinéraire,
- le niveau tactique qui intègre les processus d'analyse de la situation routière, de prise de décision et de planification des actions de conduite (choix d'un but) à engager dans le contexte situationnel du moment. L'importance des informations transmises par la tâche de conduite varie selon le type de route, l'expérience du conducteur, et la visibilité. La diminution des informations visuelles et des informations haptiques entraînent un effort de vigilance accrue du conducteur et donc un travail cognitif plus important (Isomura, Hara et al. 1995). Plus la tâche est simple moins l'effort cognitif est important.
- le niveau opérationnel, qui concerne la planification détaillée des actions de conduite (changer de vitesse, garder un cap, freiner) sélectionnées au niveau tactique. Il gère la mobilité et les forces musculaires : des membres inférieurs pour l'accélération, le freinage et le changement de vitesse; des membres supérieurs pour la gestion du volant, les changements de direction, des mouvements de la tête, essentiellement latéraux pour la gestion d'une intersection, d'un changement de file, d'une manœuvre de parking, etc.



**Fig. 2: Les trois niveaux de la tâche de conduite selon Michon (1985).**

Par exemple, Cantin, Lavallière et al. (2009) montrent que le temps de réaction des conducteurs âgés est plus long que celui de conducteurs plus jeunes. Ils en concluent alors que la charge mentale de travail (le processus cognitif) est plus élevée pour le conducteur âgé. L'expérience du conducteur est également un critère qui influence la réponse motrice. Treffner, Barrett et al. (2002 (b)) montrent que les conducteurs expérimentés anticipent plus le freinage que les conducteurs novices. Enfin, les effets du sexe et du handicap mental selon Innes, Jones et al. (2007) influencent les processus cognitifs en conduite automobile.

### 2.3. Conclusion

Cette partie a montré que les informations visuelles, auditives de l'environnement de conduite et la proprioception influencent la réponse motrice, mais surtout l'effort de traitement cognitif : moins ces informations sont évidentes plus le travail cognitif est important. Pour ne pas trop solliciter les ressources cognitives, la tâche expérimentale proposée doit être simple et engendrer une seule possibilité de réponse motrice. La réponse motrice effectuée dépend du niveau de compétence (i.e. expertise du conducteur) et/ou des ressources physiques (différentes selon l'âge ou le sexe) du conducteur.

Dans une situation de manœuvres à basse vitesse, la part des ressources physiques est prépondérante, notamment au niveau des membres supérieurs. Le paragraphe suivant s'intéresse plus particulièrement à l'action des membres supérieurs dans le geste de tourner le volant.

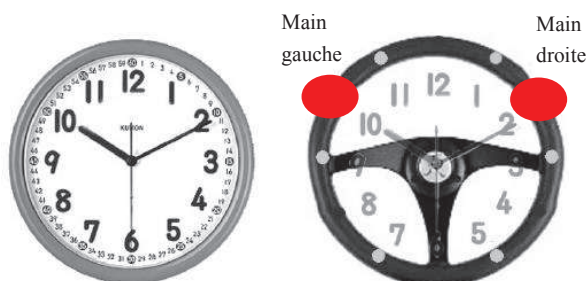
## 3. Cas particulier du geste de tourner le volant

Le geste de tourner le volant peut être défini comme une action motrice des mains sur le volant qui implique une certaine vitesse, position et force du membre supérieur. En France, il y a peu de recommandations sur le geste de tourner le volant. Seules les fiches pédagogiques de l'apprentissage de la conduite à destination des moniteurs d'auto-école proposent des recommandations. Par contre, l'apprentissage de la conduite aux Etats-Unis n'étant pas réglementé par les auto-écoles le centre de recherche national en sécurité routière (i.e. NHTSA) émet des recommandations par rapport au geste de tourner le volant.

### 3.1. Position des mains

#### 3.1.1. Nomenclature

Pour décrire la position des mains, la référence au cadran horaire est choisie dans ce manuscrit. Le premier chiffre indique la position de la main gauche et le second celle de la main droite (Fig. 3).



**Fig. 3 : Exemple de position de la main en référence au cadran horaire, en rouge la position des mains, main gauche à 10h et mains droite à 2h, soit la position des mains 10h et 2h.**

#### 3.1.2. Recommandations

En France, les fiches pédagogiques préparant au diplôme du BEPECASER<sup>4</sup> (Brevet pour l'Exercice de la Profession d'Enseignant de la Conduite Automobile et de la Sécurité Routière) éditées par le Ministère de l'Intérieur, préconisent, lors d'un virage, de déplacer les mains, l'une au dessus de l'autre, pour une meilleure maîtrise du véhicule. Aucune recommandation n'est prescrite pour la ligne droite ou la marche arrière.

Aux Etats-Unis, le groupe de travail de la National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)<sup>5</sup> propose des recommandations vis-à-vis de la position des mains à adopter dans des situations de contrôle du véhicule en ligne droite, dans un virage, lors d'une manœuvre à basse vitesse ou bien en marche arrière.

Pour la situation de conduite en ligne droite, les experts de la NHTSA préconisent une position des mains à 9h et 3h sur le volant pour plusieurs raisons :

- avec l'apparition des airbags la position 10h et 2h a été délaissée. En effet, lors de l'ouverture de l'airbag, des blessures (brulures, contusions voire fractures) des avant-bras, sont possibles (Jernigan, Rath et al. 2003),
- la position 9h et 3h les mains sont moins hautes et elles reposent souvent sur les branches du volant. Dès lors, la position est moins fatigante et plus confortable par rapport à la position 10h et 2h (Nishiyama, Uesugi et al. 2000). Dans cette position, les mains sont diamétralement opposées et donc bien réparties sur le volant. Cela offre une plus grande amplitude possible de mouvement sans déplacer les mains. Pour cette même raison, cette position permet un meilleur contrôle de la direction.

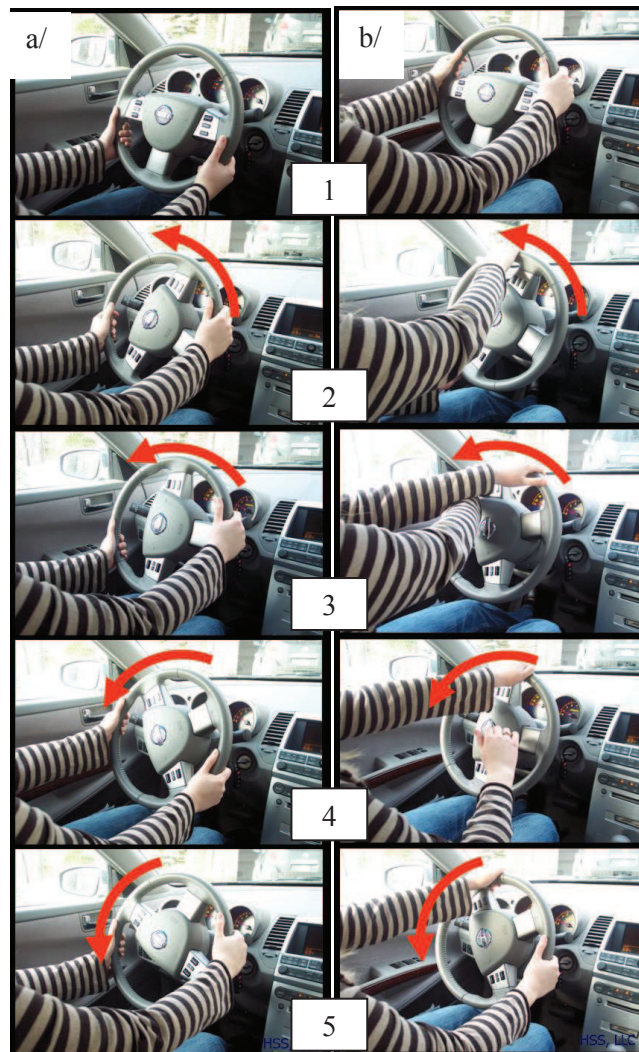
---

<sup>4</sup> [http://bepecaser.sirgo.fr/cariboost\\_files/tenir\\_20et\\_20tourner\\_20le\\_20volant.pdf](http://bepecaser.sirgo.fr/cariboost_files/tenir_20et_20tourner_20le_20volant.pdf)

<sup>5</sup> [www.nhtsa.gov/staticfiles/nti/teen-drivers/pdf/steeringtechniques.pdf](http://www.nhtsa.gov/staticfiles/nti/teen-drivers/pdf/steeringtechniques.pdf)

Dans un virage, la NHTSA recommande de tourner le volant une main après l'autre (Fig. 4a) : les mains sont placées dans la partie basse du volant à 8h et 4h (1). Pour un virage à gauche, la main droite tourne le volant de 90° vers la gauche (2) et la main opposée laisse glisser le volant tout en remontant à sa position initiale pour de nouveau saisir le volant et le tourner le volant de 90° supplémentaires vers la gauche (3). Pendant que la main gauche contrôle le volant, la main droite se replace en position initiale et ajuste la trajectoire du véhicule (4). Le virage est maintenu les deux mains sur le volant (5). Le processus s'inverse pour un virage à droite. Le conducteur utilise alors la zone entre 7h et 11h pour la main gauche et 1h et 5h pour la main droite.

Dans les situations de manœuvres à basse vitesse quand la visibilité est limitée à une intersection ou dans un parking, le tourner du volant une main au-dessus de l'autre (Fig. 4b) est préconisé. Les mains sont placées à 9h et 3h (1). Pour un virage à gauche, la main droite tourne le volant vers la gauche (2) pendant que la main opposée lâche le volant et passe au-dessus de la main droite pour venir rattraper le volant (3). La main droite lâche alors le volant (4). La main gauche prend le relais en tournant le volant pendant que la main droite se replace en position initiale (5). Le processus s'inverse pour un virage à droite.



**Fig. 4: a/ Placement des mains lors d'un tourner le volant une main après l'autre et b/ une main au dessus de l'autre lors d'une manœuvre à basse vitesse (source : NHTSA).**

Pour la NHTSA, la marche arrière ou le contrôle des commandes périphériques (clignotant, radio, vitesse, etc...), le volant peut se tourner à une main. C'est une position critique pour des réactions rapides sur le volant, pour gérer la stabilité du véhicule et également pour le risque de blessures potentiel à l'ouverture de l'airbag. Placer la main à 12h est recommandée pour les actions de marche arrière (Fig. 5).



**Fig. 5: Tourner le volant à une main lors d'une marche arrière (source : NHTSA).**

Ces recommandations, qui émanent de la France et des Etats-Unis, montrent que quel que soit le geste choisi pour exécuter un virage en marche avant, une grande mobilité des mains sur le volant est indispensable. La mobilité des mains résulte de l'action des membres supérieurs. La partie suivante décrit l'anatomie du membre supérieur.

### **3.2. Description anatomique du membre supérieur**

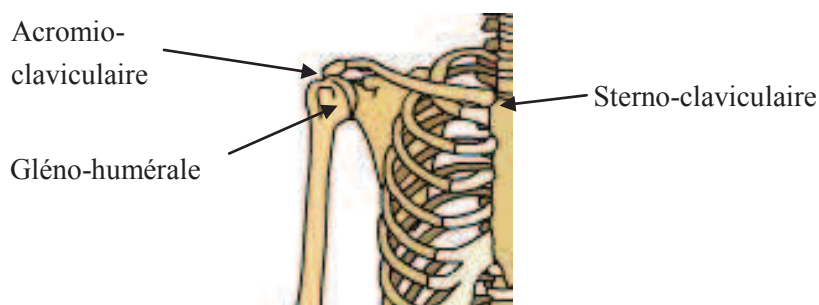
Le membre supérieur est constitué de 4 segments (la clavicule, le bras, l'avant-bras et la main) et 3 articulations (épaule, coude, poignet) (Marieb 1999). L'action du membre supérieur dépend de la mobilité articulaire et de l'action des muscles le composant. Son analyse biomécanique demande la connaissance de la position des centres articulaires afin d'estimer les longueurs segmentaires et les angles articulaires. Une première partie décrit la structure ostéo-articulaire et le calcul des centres articulaires pour chaque articulation du membre supérieur. Une seconde partie présente ses muscles.

#### **3.2.1. Structure ostéo-articulaire et calcul du centre articulaire**

- L'épaule

L'épaule est l'articulation reliant le bras au thorax. Les os qui composent cette articulation sont l'humérus, la scapula, la clavicule et le sternum. Trois articulations (Fig. 6) relient ces os entre eux :

- l'articulation gléno-humérale reliant l'omoplate à l'humérus
- l'articulation acromio-claviculaire entre l'omoplate et la clavicule
- l'articulation sterno-claviculaire reliant le thorax et la clavicule



**Fig. 6: Articulations de l'épaule.**

L'articulation de l'épaule permet une grande mobilité du membre supérieur, selon les axes transversaux, antéro-postérieur, vertical et longitudinal de l'humérus (Annexe 1). Cette grande liberté articulaire permet à l'épaule des mouvements de rétropulsion (extension) et antépulsion (flexion), dans le plan sagittal (annexe 1), abduction et adduction dans le plan frontal, rotation externe et interne dans le plan transversal (Kapandji 1974).

Lors de la conduite automobile, l'épaule est fortement sollicitée. Elle permet l'élévation du bras pour amener les mains sur la partie haute du volant ou l'abaissement du bras pour amener la main dans la partie basse du volant (Luttgens and Wells 1982). Le Tableau 1 présente les amplitudes articulaires de l'épaule chez le sujet sans déficiences motrices :

**Tableau 1: Amplitudes articulaires de l'épaule chez le sujet sain (Kapandji, 1974).**

Mouvement	Amplitude	Description
Antépulsion (flexion)	180°	<p>The diagram shows a person's arm raised vertically. The upward position is labeled 'FLEXION' and the downward position is labeled 'EXTENSION'.</p>
Rétropulsion (extension)	45 à 50°	
Abduction	180°	<p>The diagram shows a person's arm moving away from the midline. The full range is labeled '180°' and 'Abduction'. The position close to the midline is labeled '50°' and 'Adduction 0°'.</p>
Adduction + flexion	30 à 45°	
Rotation externe	80°	<p>The diagram shows a person's arm at the side. The outer position is labeled 'LATERAL' and the inner position is labeled 'MEDIAL'.</p>
Rotation interne	95°	

En analyse cinématique, la mesure des déplacements de l'omoplate et de la clavicule (notamment la rotation axiale de la clavicule non négligeable) sont difficilement mesurables à partir de marqueurs externes (Pronk G. M., 1991). Bien souvent le centre articulaire de l'épaule est assimilé au centre de rotation de l'articulation gléno-humérale (Chèze, Gutierrez et al. 1996; Schmidt, Disselhorst-Klug et

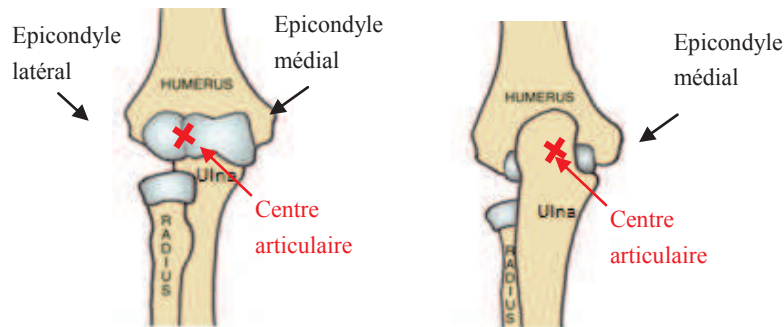


al. 1999; Wang 1999). Il est estimé à partir d'équation de régression (Meskers, Van der Helm et al. 1997) ou de la méthode de sphère fitting (Gamage and Lasenby 2002) car il n'est pas directement visible, ou palpable. A l'aide d'équations de régression, Schmidt, Disselhorst-Klug et al. (1999), dans son étude sur la marche, positionnent le centre de l'épaule à 7 cm en dessous du marqueur placé sur l'acromion. Rab, Petuskey et al. (2002) proposent de le positionner en fonction de la distance séparant les deux acromions. L'offset entre l'acromion et le centre artulaire est égal à 17% de la distance entre les deux acromions, dans leur étude du mouvement du toucher de la tête avec la main.

D'autres auteurs tels que Wang (1999), Biryukova, Roby-Brami et al. (2000) privilégient la méthode de sphère fitting pour les mouvement en 3D. Cette méthode détermine le centre artulaire comme étant le centre de rotation de sphères décrites par des marqueurs apposés sur le bras lors de mouvement flexion/extension, adduction abduction, rotation bras tendu.

- Le coude

Le coude est l'articulation située entre le bras (humérus) et l'avant-bras (radius/ulna) (Fig. 7).



**Fig. 7 : A gauche, vue antérieure de l'articulation du coude droit et à droite, vue postérieure de l'articulation du coude droit. Le centre artulaire est représenté par la croix rouge.**

Physiologiquement, le coude permet deux mouvements : la flexion/extension et la prono/supination (Fig. 8). Le mouvement de flexion/extension varie de 0 à 145° et l'amplitude de pronation (respectivement supination) est de 85° (90°) pour le sujet sain (Kapandji 1974).

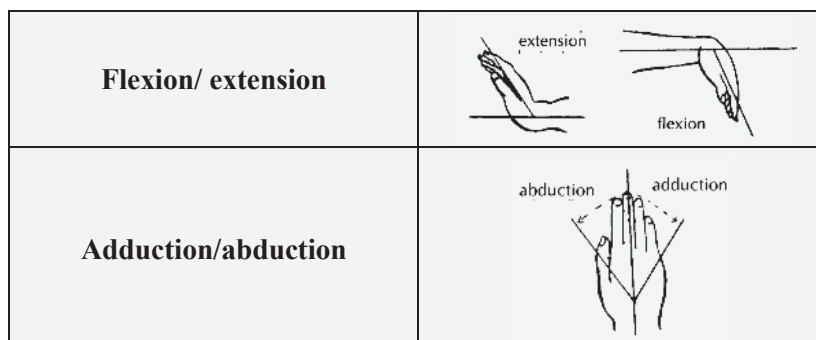
<p><b>Flexion/extension</b></p>	
<p><b>Prono/supination</b></p>	

**Fig. 8 : Description du mouvement de flexion/extension et de prono/supination du coude.**

Le centre artulaire du coude est habituellement situé au milieu du segment défini par l'épicondyle médial et l'épicondyle latéral (Rau, Disselhorst-Klug et al. 2000; Roux 2002). (Fig. 7)

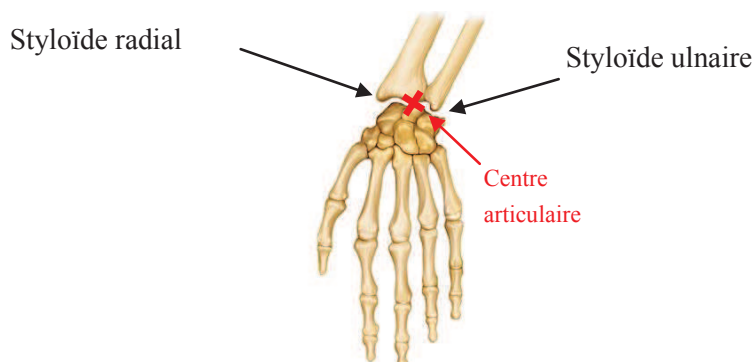
- Le poignet

Le poignet est l'articulation distale du membre supérieur (Kapandji 1974; Calais-Germain 1984) . Ce dernier peut réaliser des mouvements de flexion/extension (flexion de 80° en actif et 85° en passif, extension de 80° en actif et 85° en passif, chez le sujet sain) et d'abduction/adduction (abduction de 15°, adduction de 45°, chez le sujet sain) (Fig. 9).



**Fig. 9 : Description du mouvement de flexion/extension et d'abduction/adduction du poignet.**

Le centre articulaire du poignet est situé au milieu du segment défini par les styloïdes ulnaire et radial (Roux 2002) (Fig. 10).



**Fig. 10 : Articulation du poignet, le centre articulaire est représenté par la croix rouge.**

### 3.2.2. Myologie

Les mouvements du membre supérieur sont générés par de nombreux muscles. Les muscles principaux du bras et de l'avant-bras et leurs actions sont présentés dans le Tableau 2. La localisation de ces muscles est donnée dans l'annexe 2.

Au regard de la littérature (Hostens and Ramon 2005; Balasubramanian and Adalarasu 2007; Pennestri, Stefanelli et al. 2007), seuls les muscles superficiels sont étudiés dans les tâches de conduite car leur activité électrique peut être mesurée de manière non invasive et avec facilité à l'aide d'EMG (ElectroMyoGraphie). D'après Pick and Cole (2006 (a)), les 3 faisceaux du deltoïde, les 2 chefs du pectoral, le chef long du triceps et le biceps sont les principaux muscles qui entrent en jeu dans les rotations de petites amplitudes du volant (pour un mouvement de la main droite entre 1h et 5h et 7h et 11h pour la main gauche) car ils permettent l'élévation et l'abaissement du bras ainsi que sa rotation. Pour des mouvements de plus grandes amplitudes, pour manœuvrer par exemple, à notre connaissance

aucune étude ne précise les muscles d'intérêt. Pourtant le conducteur serre son volant, des muscles de l'avant-bras participent donc.

**Tableau 2 : Actions et plan des principaux muscles du membre supérieur.**

Actions	Muscles	Plan
Abduction	Deltoïde	Epaule
	Sus épineux	
	Trapèze	
Adduction	Deltoïde	Epaule
	Sous scapulaire	
	Grand pectoral	
	Grand rond	
	Coraco brachial	Bras
	Extenseurs des doigts	Avant-bras
	Fléchisseurs du carpe	
Rotation externe	Sous épineux	
	Petit rond	
Rotation interne	Grand dorsal	Epaule
	Grand pectoral	
Flexion	Deltoïde	Epaule
	Coraco brachial	Bras
	Brachial antérieur	
	Biceps	
	Fléchisseur du carpe	Avant-bras
Extension	Deltoïde	Epaule
	Triceps	Bras
	Extenseurs	Avant-bras
Pronation	Rond pronateur	Avant-bras
	Carré pronateur	
Supination	Court et long supinateur	Avant-bras
	Brachio radial	

Source : Anatomie et Physiologie humaine, E. Marieb, ed. De Boeck University, 4<sup>ème</sup> édition 1999

### 3.3. Conclusion

Cette partie a montré que deux stratégies de tourner le volant sont recommandées dans un virage en marche avant : le tourner du volant une main après l'autre ou le tourner du volant une main par-dessus l'autre. Tourner le volant implique donc une grande mobilité des mains sur le volant quelque soit la stratégie utilisée. La deuxième partie montre que la structure articulaire et musculaire du membre supérieur offre cette grande mobilité chez le sujet ne présentant pas de trouble de la motricité. Les définitions des centres articulaires de l'épaule du coude et du poignet, habituellement rencontrées dans la littérature, ont été rappelées. Seuls des muscles du bras et de l'épaule sont étudiés pour des exercices

demandant de petites rotations du volant. Les muscles de l'avant-bras sont à considérer pour des rotations plus grandes, telles que les manœuvres à basse vitesse.

Néanmoins, des personnes ayant des ressources motrices (force et mobilité) diminuées peuvent continuer, avec l'aide d'aménagements spécifiques, à conduire leur véhicule. Dans la partie suivante, la réglementation concernant la conduite de la personne handicapée ainsi que les aides existantes sont présentées.

## 4. Cas de la conduite adaptée

### 4.1. Etat des lieux du permis en France

La voiture est devenue un moyen de transport indispensable aujourd'hui. Le nombre de permis obtenus en France en 2011 dépasse les 900 000 (Tableau 3), toutes catégories confondues.

**Tableau 3 : Nombre de permis distribués en France en 2011 (Source : INSEE)**

Année 2011	France métropolitaine
Véhicules de tourisme	742 367
Poids lourds	40 099
Transports en commun	5 147
Motos et vélomoteurs	119 654
Total	907 267

Les personnes âgées de plus de 18 ans (pas de limite d'âge) peuvent se présenter à l'examen du permis de conduire. Ce titre est aussi accessible aux personnes handicapées physiques, sous réserve que la personne soit reconnue apte à conduire après un examen médical. Toutefois, certaines affections sont incompatibles avec l'obtention ou le maintien du permis de conduite car elles représentent un danger pour la sécurité routière. L'arrêté du 21 décembre 2005, consultable sur le site de Legifrance, énumère ces incapacités<sup>6</sup>. Dans ce cas, contrairement aux autres conducteurs, la validité du permis de conduire diffère selon l'âge du conducteur<sup>7</sup> :

- 5 ans si le conducteur est âgé de moins de 60 ans,
- 2 ans entre 60 et 76 ans,
- 1 an après 76 ans.

A l'expiration de la durée de validité, le sujet passe une nouvelle visite médicale qui définit ou non le prolongement du permis, en fonction de l'évolution du handicap.

---

<sup>6</sup> <http://www.legifrance.gouv.fr/>

<sup>7</sup> <http://www.permisdeconduire.gouv.fr/index.php>

Sous réserve de l'acceptation du candidat par la commission médicale, l'accès à la conduite automobile est autorisé à des personnes dont les pathologies sont diverses. Une description des handicaps de l'appareil locomoteur autorisant la conduite automobile et étudié dans le cadre du projet ANR VolHand est exposée en annexe 3. Pour compenser le handicap, des aménagements du véhicule sont indispensables.

#### 4.2. Aménagements existants

Les aménagements mécaniques d'aide à la conduite ont fait l'objet d'une revue de littérature par Monacelli, Dupin et al. (2009). Ils recensent quatre dispositifs d'aides différents :

- aides au contrôle du véhicule,
- aides à l'accessibilité,
- aides au transfert,
- aides au chargement du fauteuil roulant.

Par la suite, ne seront considérées que les aides au contrôle du véhicule, plus spécifiquement les aides au contrôle de la direction. Les aménagements concernant la gestion de la vitesse du véhicule ne sont pas présentés dans ce mémoire.

Les dispositifs rajoutés sur le poste de conduite dépendent de la pathologie et de la dextérité du candidat. La commission médicale définit les aménagements nécessaires au regard des aptitudes du conducteur et de l'avis du médecin et de l'ergothérapeute. Les aménagements concernent :

- le volant, avec l'ajout de dispositifs facilitant la gestion de la direction. La Fig. 11 montre trois dispositifs d'aide à la direction : la boule, la fourche et le joystick,



Fig. 11: Les systèmes d'aide à la direction.

- la direction sur-assistée : le niveau d'assistance de la direction peut être réglé. Cette solution présente divers inconvénients : elle impose notamment un excellent contrôle du véhicule du fait de la faible résistance du volant (fonction du poids du véhicule, de la pression des pneus...). La modification est par ailleurs effectuée par un professionnel et est non réversible.

Le véhicule devient alors un véhicule pour un conducteur unique avec une assistance spécialement réglée en fonction de ces capacités physiques du jour de la modification,

- ou les deux.

La sur-assistance ne semble donc pas bien adaptée aux personnes ayant des pathologies sur le membre supérieur, d'autant plus si cette pathologie est évolutive. Le paragraphe suivant revient sur le principe de fonctionnement de la direction assistée.

### 4.3. Principe de fonctionnement de la direction assistée (DA)

Pour tourner un volant le conducteur applique un effort sur le volant. Cet effort est transmis dans les roues via la rotation du pignon qui déplace latéralement la crémaillère et fait tourner le porte fusée lié à la roue par l'intermédiaire de la biellette de direction (Fig. 12).

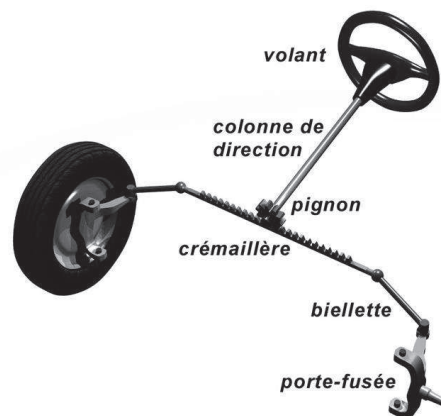


Fig. 12: Principe de la direction d'un véhicule léger.

La direction est dite assistée quand la force des bras du conducteur sur le volant n'est pas la seule force utilisée. La direction assistée permet de diminuer l'effort au volant en conservant une amplitude de rotation du volant limitée. Il en existe quatre types (Gordon 2000):

- la Direction Assistée Hydraulique (DAH),
- la Direction Assistée Electro-Hydraulique (DAEH),
- la Direction Assistée Electrique (DAE),
- la Direction déconnectée (Steer-by-Wire).

L'originalité de ce dernier système est la suppression de l'arbre de transmission entre le volant et les roues. C'est un moteur électrique qui pilote la direction du véhicule comme peut le faire une DAE dans un stationnement automatique (Badawy, Zuraski et al. 1999). Néanmoins, ce système n'est pas utilisé en Europe. L'absence de liaison mécanique entre le volant et les roues implique une

reproduction des sensations de conduite indispensables à la bonne maîtrise d'un véhicule et à la sécurité de ses occupants. Ce système présente l'avantage d'être facilement programmable et utilisable dans un simulateur automobile, par exemple (Amberkar, Bolourchi et al. 2004).

La cartographie est « une partie » du bloc de commande de la direction assistée. Depuis leur apparition, les cartographies des directions assistées ont comme entrées le couple conducteur et la vitesse du véhicule (Fig. 13). L'objectif de la loi de commande est alors de produire le couple d'assistance donné par la cartographie. La procédure de réglage de la cartographie suit un protocole bien défini. Des conducteurs sains (sans déficiences des membres supérieurs) procèdent à plusieurs tests de conduite en situation de basse, moyenne et grande vitesse. Un opérateur installé dans le véhicule modifie l'assistance à la convenance des conducteurs, selon un avis subjectif (Green, Gillespie et al. 1984).

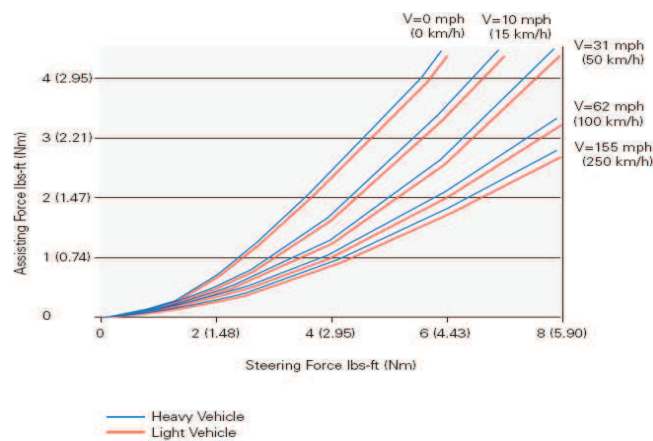


Fig. 13 : Exemple de cartographie par Volkswagen of America Inc (2004)

Par suite, les lois de commandes actuelles ne sont pas spécifiquement adaptées aux conducteurs ayant des déficiences du membre supérieur car elles sont basées sur ce type de cartographie, construites sur le ressenti des conducteurs sans déficiences motrices.

#### 4.4. Conclusion

Cette partie a montré qu'après avis favorable de la commission médicale, la personne présentant des troubles moteurs du membre supérieur peut conduire. La conduite de ces personnes peut être facilitée par des aménagements spécifiques d'aide à la direction notamment grâce à la modification de la direction assistée (DA). Actuellement, la DA est réglée pour faciliter la conduite des sujets sans déficiences du membre supérieur.

Dans le but de développer des directions assistées spécifiquement adaptées aux personnes ayant des déficiences au niveau des membres supérieurs pendant une situation de conduite à basse vitesse, une

première étape est de comprendre le geste de tourner le volant. Dans la partie suivante, une synthèse des études s'intéressant à la tâche de tourner le volant est effectuée.

## **5. Etudes d'analyse du mouvement des membres supérieurs en conduite automobile**

Elles s'intéressent à la position et à l'activité musculaire des membres supérieurs et à l'interaction main/volant par la mesure des efforts, de la position des mains et du confort du conducteur. Pour la mesure de ces variables, différents outils de mesure sont utilisés : caméra optoélectronique, EMG, dynamomètres, grille d'observation vidéo et vidéo numérique. Les travaux recensés dans la littérature sont présentés en 5 points : les études réalisées à partir de vidéos numériques, les études basées sur la motion capture, les études EMG, les mesures au volant et les études ergonomiques.

### **5.1. Etudes réalisées à partir de vidéos numériques**

Dans ces études, la position des mains sur le volant lors de tests sur route dans un véhicule réel est privilégiée et observée pour :

- quantifier la charge mentale de travail imposée par une situation de conduite
- évaluer le risque de blessures lors d'impact arrière ou frontal.

Par exemple, Walton and Thomas (2005) étudient la position des mains sur le volant en situation d'insertion dans un trafic plus ou moins dense. Ils font l'hypothèse que la position des mains reflète le risque perçu par le conducteur : plus le risque perçu augmente plus le nombre de mains sur la partie haute du volant augmente. Pour observer le nombre de main sur le volant, ils découpent le volant en deux zones, la partie haute et la partie basse et comptent le nombre de mains -0, 1 ou 2- présent dans la moitié haute située entre 9 heures et 3 heures (Fig. 14). De Waard, Van den Bold et al. (2009) analysent, quant à eux, la position relative de chacune des mains sur la totalité du volant. Ces positions sont assujetties en niveaux de contrôle : contrôle haut, moyen et bas. Par exemple, si les mains droite et gauche sont respectivement dans les zones 2 ou 3 heures et 9 ou 10 heures, le contrôle est considéré comme haut et traduit une situation stressante ou ressentie comme dangereuse. Les résultats montrent que lorsque les conducteurs s'insèrent dans un trafic dense, les deux sont dans la partie haute du volant. Le nombre de mains ainsi que leur position sur le volant reflètent un niveau de vigilance augmentée et la recherche d'un meilleur contrôle du véhicule dans des situations de conduite où le trafic s'intensifie.

Fourie, Walton et al. (2010) tentent d'évaluer le comportement des conducteurs en fonction du sexe. Les résultats de l'étude montrent que les femmes ont tendance à passer plus de temps avec les deux

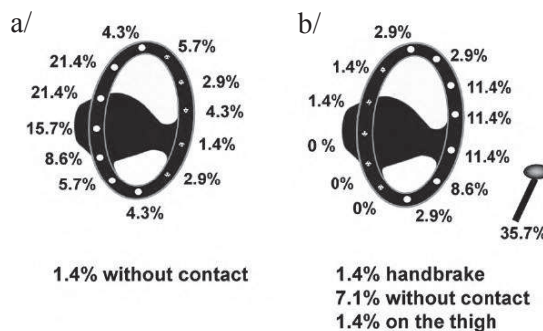


mains sur le volant dans des situations de conduite sur route et autoroute : elles sont donc plus réactives en cas d'imprévu. La situation de manœuvres à basse vitesse nécessite un bon contrôle du volant et une bonne réactivité du conducteur.



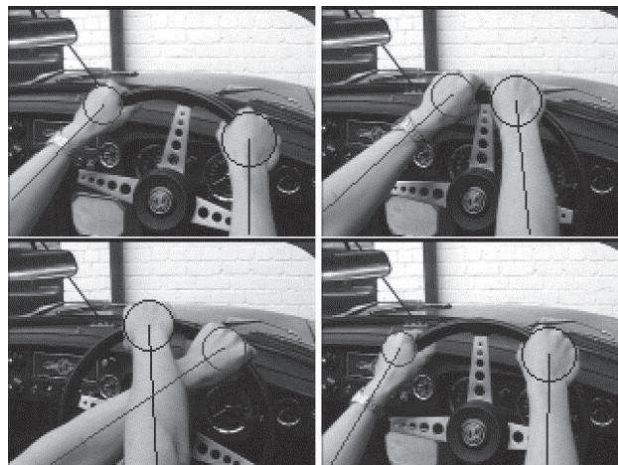
**Fig. 14: Analyse de la position des mains par Walton et Thomas en 2005.**

Par ailleurs, si la position des mains sur la partie haute est synonyme d'un meilleur contrôle du véhicule (De Waard, Van den Bold et al. 2009), elle est néanmoins une position à risque lors d'un impact arrière : Jonsson (2011) montre que les positions mains hautes (entre 10h et 2h) sur le volant augmentent le risque du coup de lapin. En sécurité routière, l'étude de la position des mains sur le volant est également réalisée pour évaluer le risque de blessure lors de l'ouverture de l'airbag suite à un impact frontal. Si les mains se croisent, le conducteur est susceptible d'être gravement blessé lors de l'ouverture de l'airbag (Lundy and Lourie 1998), (Jernigan, Rath et al. 2003). Hault-Dubrulle, Robache et al. (2010) calculent le taux d'occupation des mains droite et gauche (en %) sur tout le volant (découpage horaire), lors de la phase de pré-crash (Fig. 15). Les résultats montrent que la main gauche occupe moins de 6% du temps chaque zone de la partie droite du volant et moins de 3% du temps pour la main droite dans chaque zone à gauche du volant. L'analyse de la position des mains dans les situations de manœuvres à basse vitesse n'a pas été réalisée. L'analyse du taux d'occupation des mains sur différentes zones du volant pendant un exercice de manœuvre à basse vitesse pourrait mettre en évidence les différentes stratégies de tourner le volant recommandées par la NHTSA par exemple (cf. §3.1.2).



**Fig. 15: Taux d'occupation de a/ la main gauche et de b/ la main droite, en situation de précrash (Hault-Dubrulle, Robache et al., 2010).**

Bien souvent, les analyses font l'objet d'un post traitement non automatisé qui estime « grossièrement » (position observée et non mesurée) la position des mains lors d'une tâche simple (peu de changement de position des mains pour une conduite sur route). Aucune analyse du mouvement des mains sur le volant pendant la tâche de conduite n'a été réalisée. Pour comprendre le geste de tourner le volant, la combinaison des poses de mains successives doit être analysée dans sa globalité. L'analyse vidéo apparaît par ailleurs délicate pour un geste continu pour une population importante de conducteurs. Néanmoins, les analyses réalisées mettent en évidence différentes stratégies de tourner le volant, pour différencier les conducteurs. McAllister, McKenna et al. (2002) proposent une méthode de tracking semi automatique, des mains sur le volant par analyse vidéo. A l'aide des coordonnées des mains dans le plan du volant, trois types de positions des mains sont identifiés : les mains parallèles, les mains serrées et les mains croisées (Fig. 16). Cette procédure de tracking a été validée en statique, les mains posées sur le volant et permet la distinction droite/gauche, même quand les mains se croisent (Fig. 16, image bas gauche). Néanmoins, aucune étude, à notre connaissance, n'a retenu cette méthode, ou toute autre méthode renseignant les coordonnées de la main dans le plan du volant, pour analyser la position des mains, lors de sessions de conduite impliquant des manœuvres à basse vitesse.



**Fig. 16: Exemples d'images de tracking de la position des mains pendant la conduite (McAllister, McKenna et al. 2002), de gauche à droite et de haut en bas : mains parallèles, mains serrées, mains croisées et mains parallèle.**

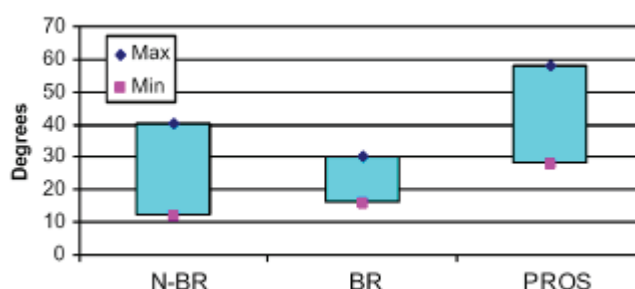
## **5.2. Etudes basées sur la Motion Capture**

### **5.2.1. Principaux résultats**

Les études, référencées dans la littérature, basées sur la motion capture sont peu nombreuses. Une seule étude trouvée utilise la motion capture pour décrire et différencier les conducteurs. D'autres études utilisent la motion capture pour construire des modèles de cinématique inverse mais ne

l'utilisent pas pour décrire le geste. Pour cela, les sujets sont équipés de marqueurs sur des repères anatomiques osseux des membres supérieurs (acromion, épicondyles du coude, styloïde du poignet) et du tronc (sternum, scapula, processus xiphoïde et C7) (cf. Fig 5, 6 et 7 § 3.2) (Carey, Highsmith et al. 2008; Hétier 2008). Les centres articulaires sont calculés comme décrits au § 3.2.1, à partir des marqueurs utilisés par les systèmes opto-électroniques.

Pour Carey, Highsmith et al. (2008), les angles articulaires sont calculés à partir de la cinématique des membres supérieurs et permettent de différencier les conducteurs avec prothèses radiales<sup>8</sup> et sains. Les sujets sains réalisent également la tâche avec des attelles de l'avant bras pour simuler la contrainte de la prothèse. Les amplitudes des angles de l'épaule, du coude et du poignet sont comparées pendant un geste simple de tourner le volant, sur un simulateur de table (cf. §6.1) : les deux mains sur le volant en position 10h et 2h. Le sujet a pour consigne de tourner le plus possible le volant vers la droite sans décoller les mains. Les résultats montrent que pour les sujets prothésés, les angles de flexion et d'abduction de l'épaule et de flexion du coude et du poignet augmentent pour compenser la perte de mobilité et garder les mains sur le volant lors d'un virage à droite (Fig. 17). Ceci montre que le handicap n'empêche pas la conduite mais modifie le geste. Le conducteur s'adapte à la tâche en fonction de ses contraintes physiques. Les angles de flexion et d'abduction de l'épaule et de flexion du coude et du poignet semblent être un indicateur permettant de différencier les capacités physiques des conducteurs.



**Fig. 17 : Différence d'amplitude de l'angle de flexion du coude, pendant une tâche de tourner le volant entre les sujets sains (N-BR), sujets sains contraints (BR) et sujets prothésés (PROS) (Carey, Highsmith et al. 2008).**

L'utilisation de tels systèmes impose certaines précautions afin d'obtenir des données exploitables. Le paragraphe suivant présente quelques généralités sur l'utilisation des systèmes optoélectroniques.

### 5.2.2. Généralités sur les systèmes optoélectroniques

<sup>8</sup> Remplacement de la tête radiale suite à une fracture ou de l'arthrose.

Les systèmes de mesures optoélectroniques (Vicon®, Motion Analysis®, Qualysis®...) permettent de capturer et d'étudier le mouvement 3D à l'aide de marqueurs placés sur la peau du sujet. Pour analyser la cinématique du membre supérieur il est nécessaire d'utiliser un modèle cinématique. Chèze, Gutierrez et al. (1996) modélisent le membre supérieur comme une chaîne cinématique reliant le tronc au bras par une articulation à six degrés de liberté (ddl). Pour d'autres études utilisant des marqueurs externes, l'articulation de l'épaule se résume à une liaison rotule. Elles réduisent ainsi le complexe de l'épaule à trois ddl (degré de liberté) en rotation (Schmidt, Disselhorst-Klug et al. 1999) (Wang 1999) (Rau, Disselhorst-Klug et al. 2000) (Rab, Petuskey et al. 2002). Ces mêmes auteurs modélisent le coude et le poignet par 2 ddl : respectivement, la flexion/extension et la prono supination pour le coude et la flexion/extension et l'abduction/adduction pour le poignet. Un ensemble de conventions a été mis en place par l'International Society of Biomechanics (ISB) et l'International Shoulder Group (ISG) : 1/ les repères segmentaires sont construits par rapport à des points anatomiques de référence (articulation palpable) 2/ une séquence de trois angles est définie pour déterminer l'orientation relative des segments adjacents. Les repères ainsi construits sont adaptés à la physiologie des mouvements.

Les systèmes optoélectroniques utilisés engendrent des erreurs de mesures. Selon (Cappozzo, Catani et al. 1995), elles peuvent être décomposées en deux principaux types :

- les erreurs liées à l'instrumentation sont imputables à la définition des caméras, aux performances des algorithmes de reconstruction tridimensionnelle, etc. Même si ce type d'erreur est minimisée avec les technologies actuelles, les données sont généralement filtrées ou lissées afin de limiter ce type d'erreurs (Allard, Bianchi et al. 1990). En biomécanique, le filtre Butterworth (d'ordre 4 et de fréquence de coupure entre 25 et 30Hz) est couramment utilisé car il déforme peu le signal (Robertson and Dowling 2003). **winter**
- les erreurs de manipulation sont les plus importantes. Elles sont liées aux conditions dans lesquelles la mesure est réalisée, c'est-à-dire le 1/positionnement des marqueurs, 2/ occultation des marqueurs et 3/les glissements de peau. (En effet, la mesure recueillie n'est pas directement liée au mouvement de l'os mais à celui de la surface corporelle).

#### 1/Le positionnement des marqueurs

Le positionnement des marqueurs dépend du protocole mais également de l'expérimentateur. La position des marqueurs est primordiale pour la détermination de l'orientation des repères locaux liés aux segments. Le placement des marqueurs doit être reproductible d'un sujet à l'autre. C'est pourquoi, il est préférable que la pose des marqueurs soit réalisée par le même expérimentateur sur des repères anatomiques visibles, facilement repérable (point osseux par exemple).

2/Pour limiter l'occultation des marqueurs, les caméras doivent être positionnées de telle sorte que les marqueurs soient visibles par au moins deux d'entre elles. Néanmoins, en cas

d'occlusion de marqueurs, des techniques d'interpolation peuvent être utilisées pour déterminer les valeurs des coordonnées des marqueurs manquants. La méthode la plus simple utilise la position et la vitesse du marqueur occulté aux instants précédents. Une autre technique consiste à utiliser une pré-expérimentation dans laquelle les coordonnées du marqueur masqué sont déterminées à l'aide d'autres marqueurs (Gillet 2004; Lempereur 2006). Cette méthode nécessite l'ajout de marqueurs complémentaires pour définir la position du marqueur occulté dans le repère local lié au segment.

### 3/Les glissements de peau

L'existence d'un glissement entre la peau et les os induit un biais dans l'estimation de la position de la structure osseuse. (Cappozzo, Catani et al. 1995) montrent que l'erreur de mesure due au glissement de la peau, est plus importante pour les marqueurs à proximité des articulations. C'est pourquoi plusieurs méthodes ont été développées afin de corriger la position des marqueurs afin de minimiser les mouvements de la peau. Veldpaus, Woltring et al. (1988) et Soderkvist and Wedin (1993), proposent de minimiser l'écart entre les positions mesurées des marqueurs et les positions idéales de ces mêmes marqueurs en position statique. Une autre méthode proposée par Chèze, Gutierrez et al. (1996), appelée solidification, consiste à calculer le mouvement du solide qui est le plus compatible avec les trajectoires des marqueurs, les trois marqueurs dont les variations de position sont minimales autour de leur position moyenne, dans le repère local lié au segment et au cours du mouvement, sont sélectionnés. Un triangle indéformable de référence est défini à partir des positions moyennes de ces trois marqueurs. A chaque instant  $t$ , le triangle indéformable de référence est superposé de manière optimale au triangle mesuré et sert à définir le repère lié au segment. Proposée par Lu and Connor (1999) pour le membre inférieur puis appliquée par Roux (2002) sur le membre supérieur, la méthode d'optimisation globale permet d'optimiser la position et l'orientation des segments corporels en considérant des contraintes cinématiques au niveau des articulations. Néanmoins, le problème des glissements de peau reste l'artefact principal de la mesure du mouvement avec des marqueurs externes.

Pour analyser la cinématique du geste de tourner le volant en prenant en compte les contraintes expérimentales imposées par les systèmes optoélectroniques, il faut prévoir :

- d'équiper le sujet de marqueurs sur les points anatomiques osseux remarquables des membres supérieurs et des mains.
- d'utiliser un simulateur de couleur opaque de préférences pour ne pas réfléchir pas les infra rouge des caméras
- d'utiliser un simulateur sans toit ni portière qui ne gêne pas au tracking des mouvements membres supérieur.

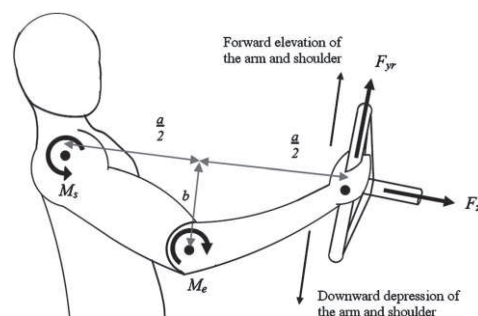
### **5.3. Etudes électromyographiques (EMG)**

L'EMG a été utilisé pour :

- étudier au travers d'un modèle dynamique la relation force/activité musculaire appliquée sur le volant (Pick and Cole 2006 (a))
- observer le taux d'activation musculaire (Pennestri, Stefanelli et al. 2007) et le délai d'activation des muscles (Matsugaura, Nishimura et al. 2005) lors d'une tâche de tourner le volant
- la fatigue musculaire (Balasubramanian and Adalarasu 2007)

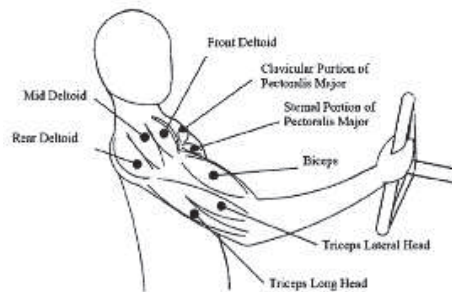
Dans toutes ces études, le geste de tourner le volant est contraint (par l'ajout d'une boule (Pennestri, Stefanelli et al. 2007) ou par une consigne restrictive qui impose de garder la main fixe sur le volant (Pick and Cole 2006 (a)) et simplifié (petite rotation du volant, environ 90°). Toutes les études précédemment citées suivent un protocole spécifique de l'utilisation de l'EMG recommandé par le SENIAM (Surface ElectroMyoGraphy for the Non-Invasive Assessment of Muscles). Pour cela les auteurs équipent le sujet avec des électrodes EMG sur les muscles superficiels de l'épaule (trapèze, grand dorsal et deltoïde), du bras (biceps et triceps) et de l'avant-bras (fléchisseurs et extenseurs du poignet et des doigts) des conducteurs. De plus, les contraintes d'utilisations des EMG (câbles ou boîtier de réception sans fil à moins de 100m) imposent des études sur simulateurs. Enfin, l'état de l'art met en avant le fait qu'il n'y a aucune étude qui étudie l'EMG des sujets âgés et/ou avec déficiences du membre supérieur, dans la tâche de conduite.

L'étude de Pick and Cole (2006 (a)) est décrite ici comme exemple d'utilisation de l'EMG. Les autres études sont renvoyées à l'annexe 4. Pick and Cole (2006 (a)) proposent un modèle de conducteur via une étude de la relation force/EMG (Fig. 18). Ce modèle est construit en 2 étapes : une première étape où la force exercée sur le volant est estimée géométriquement à partir des couples articulaires du coude et de l'épaule et une deuxième étape où les couples résultants du coude et de l'épaule sont estimés selon l'activité musculaire du bras et de l'avant-bras. Les tests sont réalisés sur simulateur avec un volant instrumenté d'un dynamomètre central. La consigne demandée est un geste simple (main droite à 3h et action du bras vers le bas) et contraint (la main ne lâche pas le volant pendant l'action).



**Fig. 18: Vue des couples inter articulaires et des forces au volant exercées par le bras droit (Pick et Cole 2006 (a)).**

Dans cette étude, les muscles étudiés sont le deltoïde antérieur, le deltoïde latéral, la portion sternale du grand pectoral, le chef long du triceps et le biceps (Fig. 19) car ils sont moteurs dans l'abaissement et l'élévation du bras.



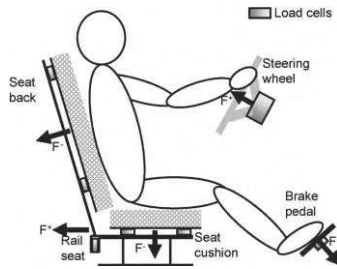
**Fig. 19 : Principaux muscles impliqués dans la tâche de tourner le volant droit (Pick et Cole 2006 (a)).**

Les hypothèses émises pour l'élaboration du modèle sont restrictives : le geste est fortement contraint (la main ne bouge pas) et les couples articulaires au poignet sont négligés car ils n'interviennent pas dans l'élévation ou l'abaissement du bras. A notre connaissance, il n'y a pas d'études où les efforts interarticulaires pendant la tâche de tourner le volant ont été calculés. Ils apportent pourtant des informations intéressantes dans l'analyse biomécanique du membre supérieur dans des études de comparaison de dispositifs pour le mouvement de transfert en fauteuil roulant (Debril, Pudlo et al. 2011 (b)) ou lors de l'analyse de la propulsion en fauteuil roulant (Desroches, Dumas et al. 2010).

#### **5.4. Mesures au volant**

Au regard de la littérature, les efforts au centre du volant et l'angle au volant sont étudiés dans les tâches de conduite automobile. Pour étudier les efforts, les auteurs utilisent des dynamomètres centraux à 3 composantes (Pick and Cole 2006 (a)), des capteurs de force à 1 composante parallèle à la colonne de direction (Hault-Dubrulle, Robache et al. 2010), des jauges de contraintes (Lawton, Cook et al. 2008). L'angle au volant est quant à lui enregistré à partir de codeur angulaire sur la colonne de direction de véhicule réel (Isomura, Hara et al. 1995) ou sur simulateur dynamique (Morvan, Tan et al. 2007) et compact (Hétier 2008).

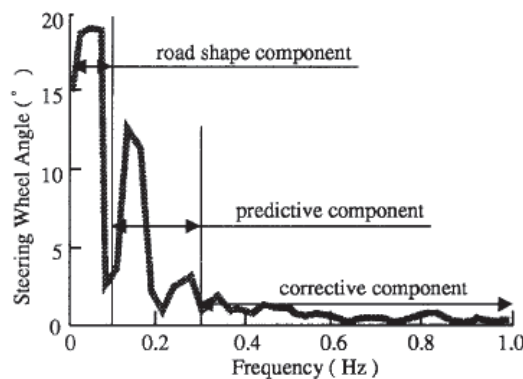
Par exemple, dans le cadre de leur étude, Hault-Dubrulle, Robache et al. (2010) s'intéressent aux efforts normaux au plan du volant dans une situation de pré-crash. Les résultats montrent qu'il y a un pic de force dans le volant pendant la phase de pré-crash. D'autres mesures sont réalisées simultanément, tels que l'intensité du freinage, la position des mains, du bras, et l'angle au volant (Fig. 20). Néanmoins, aucune d'entre-elles n'ont été réalisées pour un geste de tourner le volant en situation de manœuvres.



**Fig. 20 : Exemple d'instrumentation du volant et du siège conducteur dans l'étude de Hault-Dubrulle, Robache et al. 2010.**

L'angle au volant est utilisé en crash également, pour évaluer les comportements à risque des conducteurs (Hétier 2008). Les résultats montrent une rotation rapide du volant en situation de pré crash qui met le conducteur dans une position à risque en cas d'ouverture d'airbag (i.e. risque de blessures). Pour Isomura, Hara et al. (1995), la mesure de l'angle au volant est utilisée pour évaluer le comportement du conducteur dans différentes situations de conduite (visibilité plus ou moins réduite). Ces auteurs analysent le spectre fréquentiel de l'angle au volant et considèrent que le premier pic de basse fréquence correspond à la géométrie de la route, le deuxième pic à l'action anticipatoire du conducteur. Le reste du signal montre des oscillations dans l'angle au volant représentative de l'action de correction de la trajectoire (Fig. 21). Autrement dit, les fréquences observées dans l'angle au volant dépendent du type de route et de la visibilité des conducteurs. Les résultats montrent que :

- plus le geste de tourner le volant est fluide moins les fréquences sont grandes et plus l'angle au volant est petit.
- les basses fréquences dans l'angle au volant sont plus importantes quand la visibilité est réduite, et/ou quand la tâche demande plus d'attention.

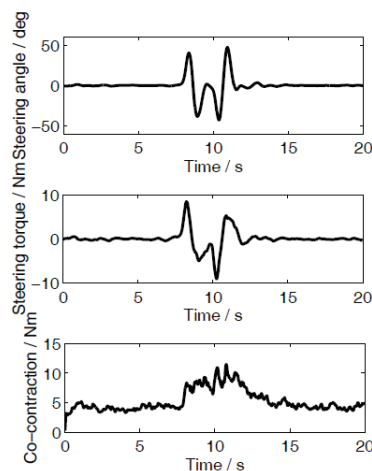


**Fig. 21: Composante fréquentielle de l'angle au volant (Isomura, Hara et al. 1995).**

Enfin, Pick and Cole (2006 (b)) estime la co-contraction musculaire des muscles du bras via le couple de rotation du volant et le couple articulaire du coude estimé par le modèle construit dans (Pick and



Cole 2006 (a)) à partir des signaux EMG et des forces tangentielles et normales appliquées sur le volant. Le couple de rotation et les forces exercées sont mesurés à l'aide d'un dynamomètre central placé sur la colonne de direction. Lors de manœuvres de changement de voie en conduite automobile, les résultats montrent que la co-contraction musculaire est maximum lorsque le couple exercé dans le volant change de signe, c'est-à-dire quand le conducteur tourne le volant dans un sens puis dans l'autre (environ 10Nm pour une amplitude du couple de rotation de 15Nm) (Fig. 22). Toutefois, ce type de capteur ne permet pas la différenciation des efforts fournis par la main droite ou gauche. De plus, l'absence d'informations par rapport à la position du bras ne permet pas l'extrapolation du calcul de dynamique inverse dans une autre position.



**Fig. 22 : De bas en haut, courbes de co-contraction, couple et angle au volant, moyennés sur 10 sur manœuvres de changement de voie, pour un sujet (Pick et Cole, 2006 (a)).**

### 5.5. Etudes ergonomiques

Les études ergonomiques sur le volant portent sur son design et le confort du conducteur. Différents design de volant sont testés avec 2, 3 ou 4 branches (Fig. 23) (Chien 2006) ou avec des sections<sup>9</sup> de volant plus ou moins larges (Edgren, Radwin et al. 2004). Les tests menés dans ces travaux, ont été réalisés sur des sujets sains uniquement, et ciblent la comparaison hommes/femmes. Ils se déroulent sur différents types de routes (voie rapide, chemin de campagne, autoroute) ou sur des simulateurs reproduisant les vibrations de la route. Les résultats montrent que :

- le volant avec 3 branches apporte un meilleur contrôle (position latérale du véhicule) et un meilleur confort car l'angle de flexion du poignet diminue (Chien 2006),
- les confort du conducteur est amélioré avec une section de volant de taille moyenne (3,2 cm) car la force de préhension est plus faible (Edgren, Radwin et al. 2004).

<sup>9</sup> Epaisseur de l'anneau



**Fig. 23 : Etude de Chien (2006) sur trois designs de volant différent.**

Le confort du conducteur par rapport à la tenue du volant est étudié grâce à l'étude des vibrations dans le volant (Morioka and Griffin 2009) (Nishiyama, Uesugi et al. 2000), à la force de préhension exercée sur le volant (Eksioglu and Kizilaslan 2008) ou à l'angle de flexion extension du poignet lors d'une action de tourner le volant (Chien 2006). Les variables observées sont la position des mains sur le volant (Nishiyama, Uesugi et al. 2000) (Chien 2006) (Eksioglu and Kizilaslan 2008), les fréquences et amplitudes des vibrations dans les bras à l'aide d'accéléromètres (Morioka and Griffin 2009) et la force de préhension sur la volant à l'aide de nappe de pression (Eksioglu and Kizilaslan 2008) ou de jauges de contraintes (Edgren, Radwin et al. 2004). Les résultats montrent, entre autre, que la position des mains a peu d'effets sur le confort ressenti du conducteur, lorsque le volant est soumis à différentes vibrations dans le volant. Le confort du conducteur dépend plutôt de la force de préhension : plus la force de préhension est grande plus l'inconfort est grand (Morioka and Griffin 2009).

L'utilisation de questionnaires est fréquente pour ce type d'études. Les questionnaires sous forme d'échelles analogiques sont souvent utilisés pour quantifier la notion de confort dans une tâche. Ce type de dispositif permet des comparaisons inter et intra-sujet ainsi que des corrélations avec la tâche effectué ou l'outil utilisé (Pearson 2009). Par exemple, Lawton, Cook et al. (2008), évalue la pertinence et l'ergonomie des aides au maintien du conducteur (i. e. ceinture seule, ceinture + siège baquet et harnais) pour la conduite pour des personnes avec des déficiences motrices. Les items évalués sont : la perception de l'effort, la confiance au matériel, et le ressenti en terme de facilité d'utilisation et confort. Les résultats montrent que les performances (vitesse du véhicule et maintien de la trajectoire) des conducteurs avec déficiences motrices sont identiques à celles des conducteurs sains mais dépendent plus d'énergie pour un même effort de rotation du volant. L'utilisation d'aides au maintien diminue ces efforts mais entraîne des sensations d'inconfort (brulures, tiraillements,...). L'étude de Peters (2001) utilise les questionnaires NASA-TLX pour comparer la conduite des sujets sains et tétraplégiques avec deux types d'aménagement frein/accélération. Ce type de questionnaire permet de mesurer la charge de travail à travers six items (Hart 2006) : la demande mentale et physique, l'effort, la frustration, la performance et la pression temporelle. Les résultats de cette étude

montrent des différences significatives entre les sujets sains et tétraplégiques au niveau de l'effort (physique et mental) et de la pression temporelle pour réaliser la tâche.

Les questionnaires peuvent compléter l'analyse des données objectives (telles que les efforts dans le volant, la position du bras/des mains, l'écart à la consigne, etc.), du point de vue du ressenti du conducteur, de la perception de la difficulté de la tâche et des habitudes de conduites. L'utilisation de questionnaires demande, toutefois, une grande prudence au niveau de l'interprétation des résultats. En effet, lorsque cet outil est utilisé comme un moyen d'auto analyse, la tâche que le sujet pensait faire est différente de la tâche réellement réalisée (Walton and Thomas 2005). Il est donc important de filmer le sujet pendant la tâche pour s'assurer de la viabilité des questionnaires.

## 5.6. Conclusion

Les études ciblant l'analyse du geste de conduite peuvent être rassemblées en 5 points (Tableau 4). Dans un premier point, les études réalisées à partir de vidéos numériques ont montré que l'analyse de la position des mains sur le volant était un indicateur du contrôle du véhicule. Le taux d'occupation de des mains sur les zones du volant est étudié en pré-crash mais peut être utilisé pour une analyse des stratégies de poses de mains. L'utilisation des coordonnées de la main sur le volant est une alternative intéressante aux études à partir d'observation vidéo pour des tâches de conduite où les mains bougent beaucoup. Dans un second point, les études sur la motion capture ont montré des stratégies de compensation du handicap dans les mouvements membres supérieurs lors d'une tâche de conduite. Ces études permettent une analyse précise du mouvement mais impliquent certaines précautions telles que l'utilisation d'un simulateur de conduite facilitant l'acquisition des marqueurs externes sur les membres supérieurs des sujets. Un troisième point montre que l'EMG est souvent utilisé pour mettre en relation activité musculaire et le couple de rotation dans le volant. Les études sur les mesures au volant montrent dans un quatrième point, que l'angle au volant peut différencier les conducteurs. De plus, les efforts appliqués sur le volant sont analysés pour détecter des réactions des conducteurs face à une situation de conduite (en pré crash, par exemple). Les efforts sur le volant n'ont jamais été étudiés lors d'une tâche de tourner le volant. Le geste de tourner le volant étant une action des deux mains sur le volant, il est intéressant d'analyser les efforts de chacune des deux mains durant cette tâche. Enfin, dans un dernier point, les études ergonomiques valident l'utilisation d'un volant avec 3 branches et de diamètre moyen (environ 3,2 cm) pour un meilleur confort du conducteur. Ces études utilisent souvent des questionnaires, couplés d'un enregistrement vidéo numérique, pour analyser les comportements des conducteurs. Toutes les variables analysées dans cette synthèse bibliographique apportent des informations sur le geste de conduite du conducteur. Néanmoins, la tâche de tourner le volant en situation de manœuvres à basse vitesse est peu étudiée. La synthèse bibliographique montre que :

- le geste est souvent contraint par une position de main imposée ou une angulation de rotation du volant faible
- l'analyse du geste est souvent limitée à une variable.

Dans ces conditions pour mieux comprendre le geste de tourner le volant en situation de manœuvres à basse vitesse, une analyse multi variables est nécessaire. Pour acquérir ces différentes variables, dans la littérature, l'utilisation de simulateur de conduite est privilégiée à l'utilisation de véhicule réel. La partie suivante présente les différents types de simulateurs utilisés.

**Tableau 4 : Tableau récapitulatif des principaux résultats des études sur la tâche de conduite.**

Les variables	Les simulateurs (cf. description §6)	Les manques
<p><i>Etudes réalisées à partir de vidéos numériques</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Position des mains (McAllister, McKenna et al. 2002; Walton and Thomas 2005; De Waard, Van den Bold et al. 2009; Fourie, Walton et al. 2010)</li> <li>- Position des bras pour estimer le risque de blessures (Hault-Dubrulle, Robache et al. 2010; Jonsson 2011)</li> </ul>	<p>Véhicules réels (Walton and Thomas 2005; De Waard, Van den Bold et al. 2009; Fourie, Walton et al. 2010; Jonsson 2011)</p> <p>Simulateur de table (McAllister, McKenna et al. 2002)</p> <p>Simulateur compact (Hault-Dubrulle, Robache et al. 2010)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas d'utilisation des coordonnées des mains</li> <li>- Pas en situation de manœuvre</li> <li>- Pas d'observation dynamique de la pose des mains</li> </ul>
<p><i>Etudes de motion capture</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Angles articulaires (Carey, Highsmith et al. 2008)</li> <li>- Position du bras via un modèle de prédiction (Hétier 2008; Hault-Dubrulle, Robache et al. 2010)</li> </ul>	<p>Simulateur de table</p> <p>Simulateur compact</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Position des mains inconnue</li> <li>- Les angles ne sont pas calculés en situation de manœuvre</li> </ul>
<p><i>Etudes EMG</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Activité électrique pour étudier la fatigue musculaire (Balasubramanian and Adalarasu 2007)</li> <li>- Activité électrique pour estimer la force musculaire (Pick and Cole 2006 (a))</li> <li>- Ordre et taux d'activation musculaire (Matsugaura, Nishimura et al. 2005; Pennestri, Stefanelli et al. 2007)</li> </ul>	<p>Simulateur de table</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas de public âgé ou avec déficiences du membre supérieur</li> <li>- Geste contraint</li> <li>- Petite giration de volant</li> </ul>

<p><i>Efforts au volant</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Efforts au centre du volant (Pick and Cole 2006 (a); Lawton, Cook et al. 2008; Hault-Dubrulle, Robache et al. 2010)</li> <li>- Analyse fréquentielle (Isomura, Hara et al. 1995)</li> <li>- Efforts interarticulaires (Pick and Cole 2006 (b))</li> </ul>	<p>Simulateur compact</p> <p>Véhicule réel</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas de différenciation entre les deux mains</li> <li>- Souvent étudié sur l'axe parallèle à la colonne de direction</li> <li>- Pas d'utilisation de la cinématique donc efforts calculés pour une position de main donnée</li> </ul>
<p><i>Etude ergonomique</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Force de préhension (Edgren, Radwin et al. 2004; Eksioglu and Kizilaslan 2008)</li> <li>- Fréquences des vibrations (Morioka and Griffin 2009)</li> <li>- Position des mains (Nishiyama, Uesugi et al. 2000; Chien 2006; Eksioglu and Kizilaslan 2008)</li> </ul>	<p>Véhicule réel</p> <p>Banc d'essai</p> <p>Véhicule réel</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas d'étude sur population avec déficiences</li> </ul>

## 6. Simulateurs de conduite

Les véhicules réels sont souvent utilisés pour des observations comportementales (cf. §5.1) et assez peu pour des analyses biomécaniques du fait de l'encombrement et de la faible mobilité des systèmes de capture du mouvement (par exemple, Vicon®). Outre la compatibilité avec les systèmes de capture du mouvement, les simulateurs de conduite offrent trois avantages majeurs : 1/ ils présentent un environnement sans danger pour le conducteur 2/ une même expérience peut être répétée aussi souvent que nécessaire dans des conditions identiques 3/ certains d'entre eux permettent une économie considérable. On rencontre dans la littérature différents types de simulateurs. Cependant leur utilisation présente des limites technologiques (synchronisation des instruments de mesure, déphasage avec le scénario, etc.), d'utilisation (mal du simulateur) ou épistémologique (problème de transférabilité des mesures acquises sur simulateur à un véhicule réel).

### 6.1. Différents types de simulateurs

- Les simulateurs de table (Fig. 24)

McAllister, McKenna et al. (2002), Balasubramanian and Adalarasu (2007) utilisent ce type de simulateur respectivement pour le tracking de la position des mains et l'analyse de la fatigue musculaire à partir d'EMG. Ces simulateurs sont conçus sur le principe du jeu vidéo. Généralement composés d'un volant de jeu et d'un micro-ordinateur avec un seul écran pour la restitution visuelle et

sonore, ils ne visent pas une immersion de grande qualité mais permettent de mettre des sujets en situation soit pour des études du comportement du conducteur soit dans un objectif de formation à la conduite. Leur principal intérêt est leur très faible coût (environ 500€, pédales, levier de vitesse et volant). Cependant ce type de simulateur est peu immersif : il n'y a pas d'habitacle, une chaise remplace le siège de conduite et le diamètre du volant est plus petit qu'un volant. Ce manque de réalisme entraîne des dispersions dans le contrôle latéral du véhicule en comparaison avec un simulateur compact, plus immersif (Jamson and Jamson 2010) et donc des difficultés de comparaison du geste de tourner le volant.

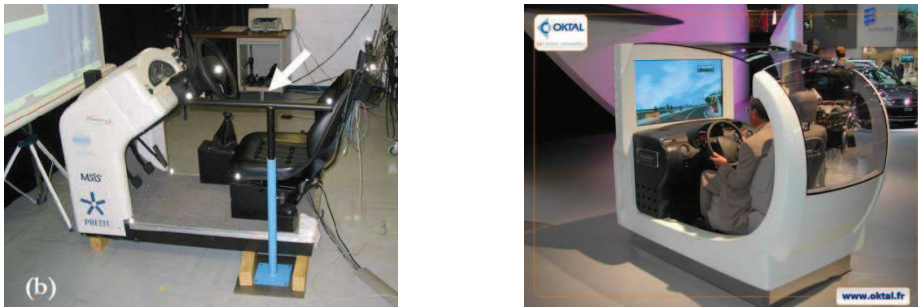


**Fig. 24 : Exemple de simulateur de table (Laab Sim, Jamson and Jamson (2010))**

- Les simulateurs compacts

Ils sont une évolution des systèmes précédents. Ils visent une meilleure immersion par l'utilisation d'une cabine de véhicule réel ou d'une maquette de poste de conduite construite en fonction des besoins. Les applications de ces simulateurs sont très nombreuses, par exemple, Hétier (2008) utilise un simulateur de type Faros ® dans son étude sur la position du bras en situation de pré-crash.

L'intérêt principal de ces simulateurs réside dans leur coût maîtrisé (environ 15k€). La maîtrise de ce coût résulte de caractéristiques optimisées pour une étude en particulier. Pour reprendre l'exemple d'Hétier (2008) seul le volant et les pédales sont instrumentés, un accoudoir côté gauche du conducteur a été rajouté mais le toit du simulateur est enlevé pour faciliter la capture du mouvement. Le développement ou l'adaptation d'un simulateur pour chaque nouveau domaine d'application est possible. Néanmoins, ces simulateurs sont fixes et ne transmettent pas d'informations inertielles sur le mouvement du véhicule au conducteur (cf. §2.1). A titre d'exemple, 2 types de ces simulateurs sont présentés (Fig. 25).



**Fig. 25 : Exemples de simulateurs compacts, à gauche le simulateur Faros<sup>®</sup> utilisé par Hétier 2008 et à droite le simulateur Oktal**

- Les simulateurs dynamiques

La majorité des fabricants internationaux de véhicules utilisent des simulateurs de conduite dynamiques. Quelques laboratoires de recherche disposent également de ces simulateurs. Ce type de simulateur est construit sur la base d'une plateforme 6 axes électriques ou hydrauliques, embarquées ou non sur des tables X-Y permettant la restitution des accélérations longitudinales et latérales sur des distances significatives. Ils visent à fournir un réalisme et donc une immersion proche de la conduite réelle, et se veulent polyvalents en termes de domaine d'application. Néanmoins leur coût très élevé (environ 800k€) et leur complexité importante font qu'ils sont principalement utilisés dans le domaine de la recherche pour le développement des véhicules ou de systèmes embarqués d'assistance au conducteur faisant intervenir la dynamique du véhicule (Pick and Cole 2007) (Pick and Cole 2008) (Hoult and Cole 2007). Trois exemples de ces simulateurs sont présentés Fig. 26.



**Fig. 26: Exemples de simulateurs dynamiques, de gauche à droite : Sherpa (LAMIH, UVHC), Ultimate (Renault) et TUDS (Tongji University Driving Simulator, Shanghai)**

## **6.2. Problématiques de l'utilisation des simulateurs**

La mise en œuvre d'un simulateur de conduite est une tâche délicate. Il faut non seulement s'assurer du bon fonctionnement de l'ensemble des modules qui le composent mais aussi leur interaction. Il existe trois types de problèmes :

- problèmes technologiques : Il s'agit par exemple, d'assurer la communication entre les différents modules informatiques de contrôle dans des délais de temps raisonnables. On peut être confronté à un problème de déphasage entre le signal visuel et la commande sur le volant, etc. Ces phénomènes de retard nuisent à la qualité de la simulation et peuvent engendrer des conflits sensoriels chez le conducteur (Advani and Hosman 2001).
- problèmes d'utilisation : C'est le mal du simulateur 3D dont les symptômes sont : nausées, sueurs froides, difficulté de concentration, fatigue des yeux, etc. Les personnes sensibles au mal des transports et les personnes âgées sont plus susceptibles d'être confrontés à ce problème (Brooks, Goodenough et al. 2010). Egalement, un temps de prise en main du simulateur d'au moins 240s doit être prévu pour étudier une gestuelle stabilisée et « naturelle » (McGehee, Lee et al. 2004). Enfin, la 3D incite la mise en place de stratégies de conduites différentes (Hofmann, Rinkenauer et al. 2010). Ces différences induisent une dispersion des mesures (i.e. différentes trajectoires du véhicule) qui rend délicate la comparaison du geste inter et intra sujet, qui plus est pour le geste de tourner le volant.
- problèmes « épistémologiques » : les mesures effectuées sur simulateurs sont-elles transférables sur le terrain ? Le traitement de ces problèmes est assez difficile à maîtriser. Des méthodes de validation sont toutefois utilisées, comme par exemple, des études sur véhicule réel (Lee, Cameron et al. 2003; Rosey, Auberlet et al. 2009) ou des questionnaires post simulation afin de recueillir les impressions des conducteurs (Guo, Cardullo et al. 2003).

## **6.3. Conclusion**

Cette partie a présenté les différents simulateurs automobiles utilisés. Le Tableau 5 fait le bilan des avantages et inconvénients de chaque type de simulateur.



**Tableau 5 : Bilan avantages/inconvénients de l'utilisation de simulateurs de conduite.**

Type de simulateur	Avantages	Inconvénients
Simulateur de table	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût</li> <li>- Systèmes de commande (i.e. pédales, volant,...) à retour d'effort</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas d'habitacle, peu immersif</li> </ul>
Simulateur compact	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adaptable selon les variables à acquérir</li> <li>- Angle de braquage du volant identique à un véhicule normal</li> <li>- Systèmes de commande (i.e. pédales, volant,...) à retour d'effort</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fixe donc pas d'informations sur le mouvement latéral du véhicule</li> </ul>
Simulateur dynamique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Environnement immersif</li> <li>- Informations haptiques ++ (le véhicule est en mouvement)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût</li> <li>- La difficulté à prendre des mesures sur le mouvement des bras du fait de l'habitacle imposant.</li> </ul>

Une analyse biomécanique du geste de tourner le volant nécessite de nombreux outils de mesure, souvent peu mobiles et encombrants, peu appropriés à l'utilisation de véhicule réel. Les simulateurs automobiles constituent alors une bonne alternative mais ne peuvent cependant pas tous convenir à notre étude. En effet, les simulateurs de table sont peu immersifs. L'habitacle peut influencer le geste de tourner le volant (i.e. main droite sur le pommeau de vitesse). Il est important de conserver un habitacle réaliste dans le simulateur utilisé sinon le geste de tourner le volant peut être biaisé. Les simulateurs dynamiques limitent l'analyse du geste du fait d'un habitacle imposant et fermé. De ce fait le meilleur compromis est la conception et fabrication d'un simulateur compact.

Pour pouvoir comparer le geste de tourner le volant de différents conducteurs, les situations de conduite en 2D sont à privilégier car elles limitent la dispersion des trajectoires.

La mise en œuvre d'une plateforme expérimentale intégrant un tel simulateur engendre une base de données conséquente. Le paragraphe suivant développe l'analyse des données (ex : ANOVA, analyse multidimensionnelle, etc.).

## 7. Analyse des données

A chaque articulation et à chaque segment sont associés des positions, vitesses, accélérations, forces, moments, selon les axes anatomiques, auxquels peuvent s'ajouter des signaux électromyographiques ou encore des données non temporelles, dans chacune des conditions expérimentales et pour chaque

sujet. Les variables peuvent être directement mesurées (par exemple, la position d'un point du segment) ou calculées (par exemple, les efforts interarticulaires). Les signaux peuvent être de durées différentes et d'amplitudes variables. L'analyse de ces données devient complexe et des outils statistiques sont utilisés pour résumer et analyser les données.

Généralement, l'étude de la variance sur la moyenne, l'écart type et les valeurs extrémales est utilisée, en biomécanique. Cette approche est généralement très restrictive (Loslever, Guerra et al. 1997) dans la mesure où :

- l'influence des différentes variables combinées est ignorée,
- en moyennant les signaux temporels sur le temps, les différences inter individuelles sont gommées.

En parallèle, des méthodes d'analyse multi variables sont aussi utilisées pour l'analyse des données. Sayarh (1991) les classe en trois catégories :

- les méthodes de régression qui expliquent une variable en fonction d'autres variables mais qui ne mettent pas en évidence les relations discriminantes,
- les méthodes de classification qui cherchent la meilleure structure en classe de l'ensemble des observations. L'inconvénient de cette méthode est que le nombre de classes doit être imposé ou connu,
- les méthodes factorielles qui visualisent les données et les liens entre elles. Deux types d'analyses sont principalement utilisés en biomécanique (Lempereur 2006; Ait El Menceur 2009) : l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et l'Analyse Factorielle des Correspondance Multiples (AFCM) (Chau 2001). Loslever (2001) souligne que l'AFCM est capable de faire ressortir des phénomènes relationnels plus complexes que ceux mis en évidence par l'ACP. Elle permet de mettre en exergue des faits plus pertinents d'une base de données constituée de nombreux signaux multidimensionnels.

L'annexe 5 revient sur les avantages et inconvénients des méthodes d'analyses factorielles multi variables.

## **8. Conclusion**

Ce chapitre a présenté une revue de littérature relative à l'analyse de la conduite automobile. La conduite automobile met en jeu des ressources cognitives, à travers l'analyse de la situation de conduite et des ressources motrices à travers la mobilisation articulaire et musculaire du membre supérieur. Plus particulièrement, le geste de tourner le volant en situation de manœuvres à basse vitesse implique une grande mobilité du membre supérieur et des mains sur le volant. Même avec des

aménagements facilitant la conduite, ce geste peut rester difficile pour les personnes ayant des déficiences motrices du membre supérieur. Une meilleure connaissance de ce geste est indispensable pour un réglage adaptée des directions assistées. Or, la synthèse bibliographique a montré que ce geste est peu étudié. Pour mieux connaître le geste de tourner le volant, il serait intéressant :

- d'un point de vue cognitif, de prévoir une situation de manœuvres à basse vitesse pour inciter le conducteur à tourner le volant. Pour éviter les dispersions des réponses motrices, le 3D est à éviter. Les informations visuelles qui sont données au conducteur doivent susciter la réponse motrice « je tourne le volant » et permettre l'anticipation du sujet pour gérer sa trajectoire. Les informations haptiques induites par un retour d'effort dans le volant sont nécessaires pour contrôler la trajectoire du véhicule,
- d'un point de vue moteur, d'analyser le mouvement des membres supérieurs et l'interaction main/volant. En particulier, la position de la main sur du volant doit être analysée car elle permet de caractériser des différences de stratégies entre les conducteurs. Par ailleurs, au regard de la littérature, d'autres variables doivent être étudiées en situation de manœuvres à basse vitesse : les angles et les efforts articulaires, l'activité électrique musculaire et les efforts parallèles à la colonne de direction. Les données recueillies peuvent être analysées directement (i.e. l'angle au volant) ou demander des calculs (i.e. efforts interarticulaires). De plus, il semble important d'instrumenter le volant de manière à mesurer les efforts développés par chaque main. Le nombre de données hétérogènes (la main sur le volant, les angles articulaires, etc.) nécessite une analyse biomécanique multi variables.

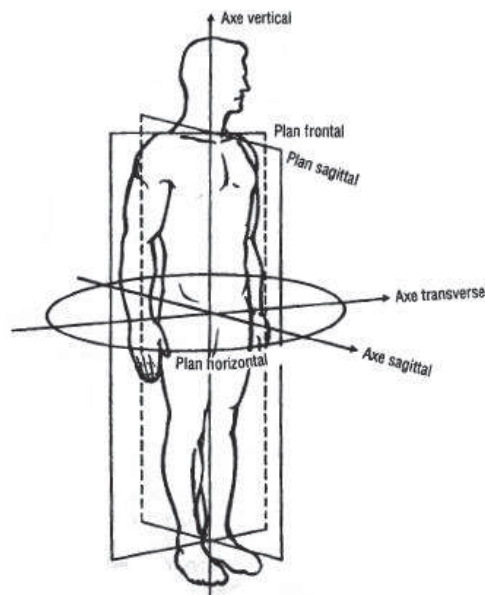
L'analyse du geste des membres supérieurs lors de la conduite impose des exigences au niveau de la plateforme expérimentale. Le matériel optoélectronique étant peu mobile, l'utilisation de simulateurs est à privilégier. Les contraintes des systèmes optoélectroniques impliquent que le champ de vision des caméras doit être dégagé : les simulateurs dynamiques sont donc à exclure. Pour l'analyse du geste de tourner le volant, le simulateur utilisé ne doit pas imposer de contraintes au niveau de l'angle de braquage : les simulateurs compacts remplissent ces critères. Pour mieux comprendre le geste de tourner le volant et créer une référence du geste de tourner le volant en situation de manœuvres à basse vitesse, la population saine, sans déficiences motrices, est étudiée dans un premier temps. Aussi, la population expérimentale choisie doit être suffisante pour pouvoir réaliser des analyses statistiques sur les variables définissant le geste de tourner le volant chez le conducteur sain.

Le chapitre suivant, présente le dispositif expérimental et les méthodes utilisées pour traiter les variables cinématiques, dynamiques et d'activité musculaire d'un mouvement de tourner le volant.

**Annexe 1 : Axes et plans de références**

Les mouvements du corps humain peuvent être définis suivant trois plans et axes de références (Fig 27) :

- Le plan horizontal comportant les axes médio-latéral et antéropostérieur, partage le corps en deux moitiés supérieure et inférieure
- Le plan frontal, contenant les axes antéropostérieur et longitudinal, partage le corps en deux moitiés avant et arrière.
- Le plan sagittal, contenant les axes antéropostérieur et vertical, partage le corps en deux moitiés droite et gauche.



**Fig. 27 : Axes de références de Williams et al. (1992) cités dans Allard and Blanchi (2000).**

**Annexe 2 : Myologie du membre supérieur**

Les Tableau 6, Tableau 7 et Tableau 8 présentent les principaux muscles de l'épaule, du bras et de l'avant-bras. Les schémas proviennent du laboratoire d'Anatomie de la Faculté de Médecine de Toulouse-Purpan.

**Tableau 6 : Principaux muscles de l'épaule.**

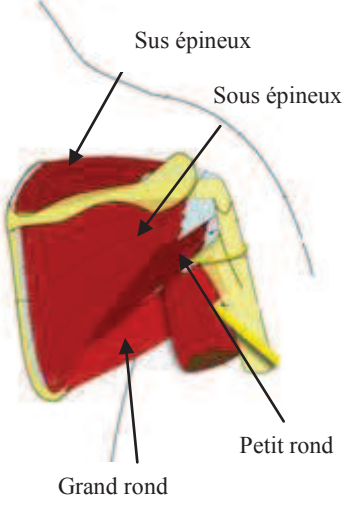
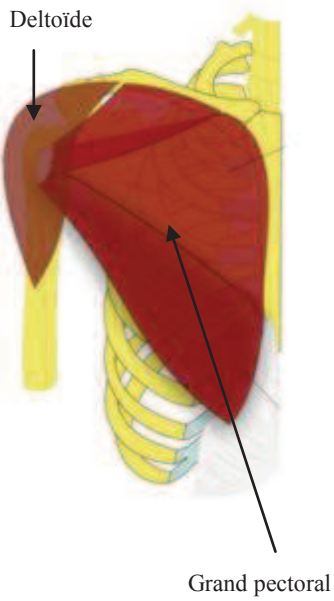
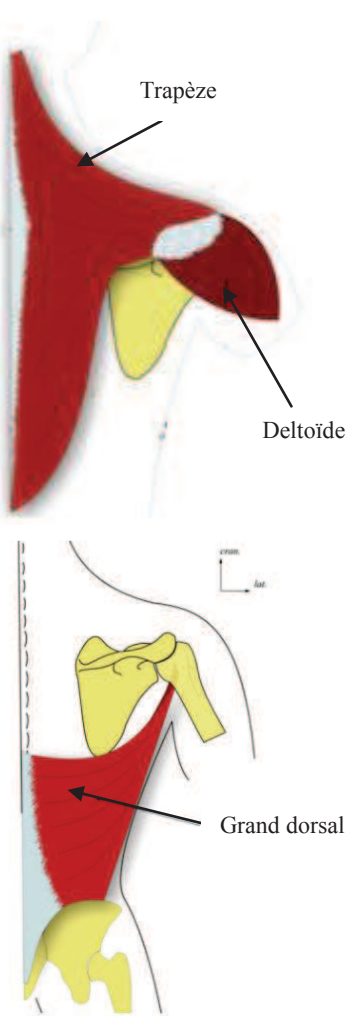
Profond (dorsal)	Superficiel (frontal)	Superficiel (dorsal)
 <p>Sus épineux Sous épineux Grand rond Petit rond</p>	 <p>Deltoïde Grand pectoral</p>	 <p>Trapèze Deltoïde Grand dorsal</p>

Tableau 7 : Principaux muscles du bras.

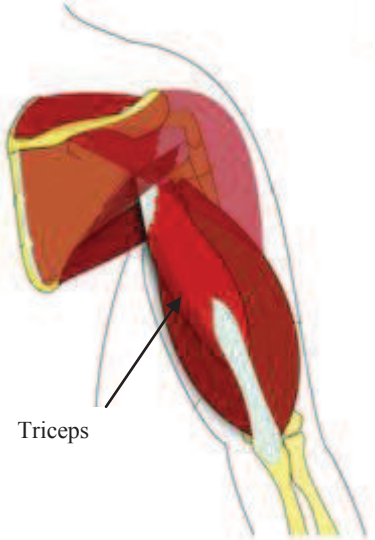
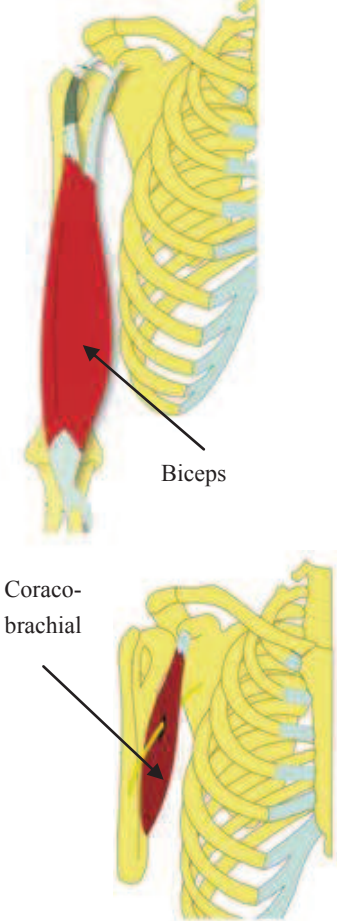
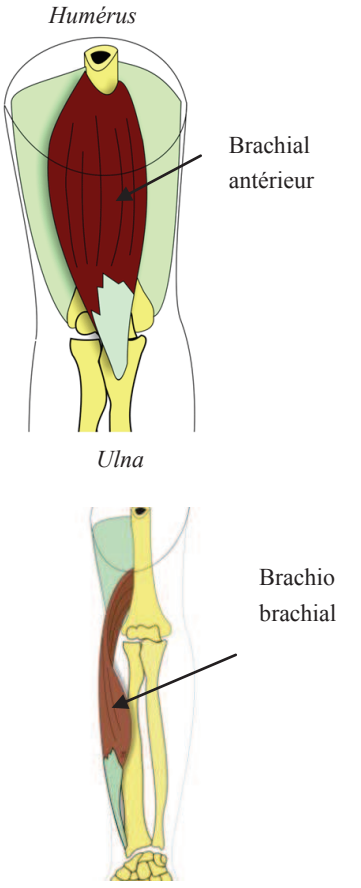
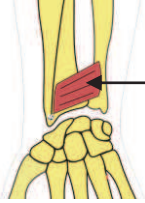
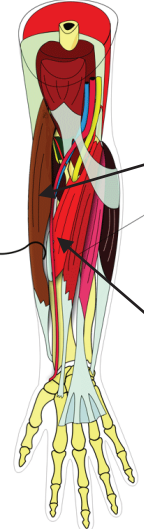
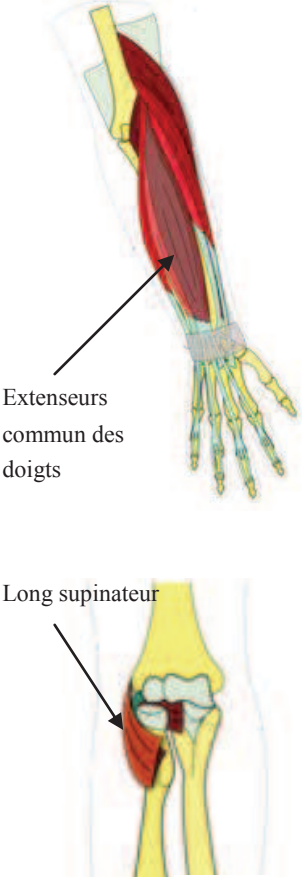
Superficiel (dorsal)	Superficiel (frontal)	Profond (frontal)
 <p>Triceps</p>	 <p>Biceps</p> <p>Coraco-brachial</p>	 <p>Humérus</p> <p>Brachial antérieur</p> <p>Ulna</p> <p>Brachio brachial</p>

Tableau 8 : Principaux muscles de l'avant-bras.

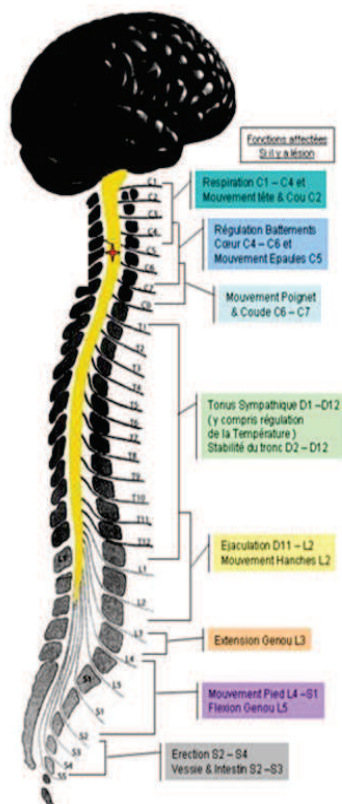
Profond (frontal)	Superficiel (dorsal)	Superficiel (frontal)
 <p>Carré pronateur</p>	 <p>Brachio brachial</p> <p>Fléchisseurs du carpe</p>	 <p>Extenseurs commun des doigts</p> <p>Long supinateur</p> <p>Radius Ulna</p>

**Annexe 3** : Description des handicaps ciblés par le projet ANR VTT VolHand

La liste des handicaps décrit n'est pas exhaustive. Elle cible la population évaluée dans le projet ANR VTT VolHand.

**1/ La tétraplégie**

- Définition



**Fig. 28: Moelle épinière et niveau de lésion.**

La tétraplégie est une paralysie des quatre membres due à une lésion de la moelle épinière au niveau cervical. En effet, la moelle épinière est considérée comme un réseau de câble électrique dans lesquels circulent les messages entre le cerveau et les autres parties du corps. Une dégradation de ce réseau entraîne des problèmes moteurs et sensitifs. Le handicap est variable en fonction du degré et du niveau d'atteinte de la moelle épinière. Plus la lésion est haute plus les troubles sensitivomoteurs sont importants (Fig. 28).

- Les causes

La tétraplégie survient principalement suite à un accident qui entraîne une lésion de la moelle épinière. Les accidents de la route le plus souvent, puis les accidents de sport, les tentatives de suicides, les plaies par armes à feu ou arme blanche peuvent entraîner des lésions médullaires.

- Les troubles

Les conséquences physiques sont différentes d'un sujet à l'autre. Les pertes concernent en premier lieu, la force motrice et la sensibilité.

**1/Les troubles physiques**

D'un point de vue musculaire, la force est considérée comme la capacité motrice qui permet à l'homme de vaincre une résistance ou de s'y opposer par un effort intense de sa musculature (Manno 1992). La diminution de la force provient de la diminution de :



- la motricité volontaire dont l'atteinte se traduit par une paralysie (atteinte complète : mouvements totalement impossibles) ou une parésie (atteinte incomplète : mouvements possibles mais de faible puissance),
- la motricité involontaire qui se traduit soit, par une augmentation de la réflectivité musculaire (hypertonie ou spasticité) soit par une disparition totale de la tonicité (hypotonie) qui peut entraîner des gestes brusques et involontaires ou le contraire.

## 2/Les troubles sensitifs

Pour les troubles sensitifs, il est possible de distinguer deux cas :

- sensibilité superficielle qui véhicule toutes les sensations cutanées : tact (sens du toucher) fin, douleur, chaud et froid, tact profond
- sensibilité profonde qui nous renseigne en permanence avec précision sur la position exacte de notre corps et sur les pressions et les mouvements de cisaillement que subit la peau : proprioception.

### *Tétraplégique et conduite automobile*

Cette pathologie pose deux types de problème dans la conduite : la stabilité du tronc et le contrôle de mouvements parasites.

## 2/La sclérose en plaque

- Définition

La sclérose en plaque est une maladie du système nerveux central qui entraîne une dégénérescence de la gaine de myéline des motoneurones (Fig. 29). Un motoneurone est un neurone qui transmet au muscle les signaux provenant du système nerveux central et périphérique. L'axone est un prolongement du corps cellulaire du neurone. Il conduit l'influx nerveux sous forme de signaux électriques.

L'axone est recouvert par une gaine de myéline enveloppe isolante qui permet à l'influx nerveux de circuler plus rapidement. Lorsque la gaine est endommagée, il y a une diminution de la transmission de l'influx nerveux

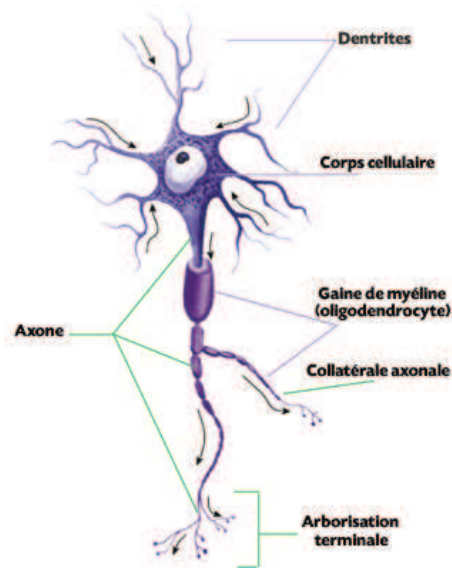


Fig. 29: Schéma d'un motoneurone.

- Les troubles

C'est une maladie évolutive qui entraîne des troubles de la motricité, troubles neurologique, troubles de la vision et troubles génitaux. Elle se fait typiquement par poussées régressives. L'espérance de vie est comparable à celle de sujets sains, et est généralement en aucun cas mortelle (rares sont les décès, souvent dus à une infection causée par les problèmes qu'engendre la maladie).

#### 1/Les troubles moteurs

- Raideur musculaire (spasticité) : ses tensions ou raideurs musculaires accrues commencent par un pied ou une jambe. Les malades n'arrivent plus à plier leurs genoux ou avec beaucoup de difficulté car cela exige beaucoup de force. Quand un bras est touché, les objets sont plus difficiles à prendre ou à tenir. Les efforts physiques avec une spasticité peuvent causer des douleurs parfois importantes.
- Paralyses (parésies) : cela se caractérise par un manque de force dans les jambes (rare pour les bras). Sensation de lourdeur importante dans les jambes. La chaleur et les efforts physiques ont une influence importante.
- Faiblesses (jambes, bras) : les jambes deviennent fatiguées et molles. Une seule envie survient ; s'asseoir. Les bras manquent de force et on peut échapper des choses.

#### 2/Troubles de la coordination :

Les troubles de la coordination et de l'équilibre font partis de la "motricité fine". Les gestes deviennent hachés, excessifs et désorganisés. Avec ces troubles, il est plus facile de se cogner, de renverser des

objets ou manquer le but en essayant de prendre des objets. Il devient difficile d'écrire, de fermer des crochets, de boutonner, d'enfiler un fil dans une aiguille. Tout devient une véritable épreuve de patience. Des tremblements peuvent apparaître lors des gestes.

*SEP et conduite automobile*

Comme la SEP est une maladie évolutive, le véhicule doit être suffisamment aménagé pour palier aux troubles éventuels qui pourraient subvenir

### **3/La Myopathie**

- Définition

La Myopathie est considérée comme la dégénérescence progressive des muscles. Contrairement à la SEP, cette maladie ne touche pas les tissus nerveux. Le processus de cette maladie se caractérise par le remplacement des fibres musculaires en cellules graisseuses et du tissu conjonctif provoquant une diminution considérable de la force musculaire. L'évolution est lente et progresse symétriquement.

- Causes

La myopathie peut être d'origine génétique (comme la myopathie de Duchenne, due à une dégénérescence du chromosome X) ou métabolique (liée à un déficit d'enzymes). Elle peut être acquise (due à une intoxication ou à une inflammation), ou encore congénitale (présente dès la naissance).

- Troubles

Sur le plan moteur, les troubles peuvent aller d'une difficulté à marcher à l'utilisation permanente d'un fauteuil électrique. Il peut y avoir également un manque de mobilité faciale entraînant des troubles de la parole, des difficultés à déglutir et à s'alimenter. Les problèmes moteurs sont souvent accompagnés de difficultés respiratoires, de troubles du rythme cardiaque, et d'un ralentissement de la croissance du squelette. L'évolution de la myopathie est lente. Elle peut se stabiliser de manière ponctuelle ou définitive.

*Myopathie et conduite automobile*

Un myopathe se fatigue très vite. C'est pour cela qu'il est important de trouver un aménagement optimum du véhicule. Cependant, peu de myopathe sont considéré apte à la conduite.

#### **4/Troubles Musculo Squelettique (TMS)**

- Définition

Ce sont des maladies professionnelles qui touchent les articulations des membres inférieurs et supérieurs. Les plus fréquents sont le syndrome du canal carpien (compression du nerf médian au niveau du poignet), les tendinites (coude, épaule...) et les atteintes du rachis (lombalgies). L'appellation TMS regroupe un grand nombre de pathologies qui induisent un coût important dans la société. Il dépasse la simple indemnisation des personnes atteintes de maladie professionnelle, l'apparition de TMS dans une entreprise va entraîner un certain nombre de dysfonctionnements, de coûts directs et indirects que l'entreprise va devoir supporter.

- Causes

Les causes des TMS sont connues et peuvent se décliner selon différents critères :

- d'un point de vue biomécanique : des efforts physiques effectués dans une mauvaise posture et souvent répétés peuvent entraîner un risque important de TMS.
- d'un point de vue organisationnel : les grandes cadences imposées par les chaînes de production contraignent le salarié dans la tâche. Son rythme de travail ainsi que le temps des pauses sont imposés.
- d'un point de vue psychosociaux : la monotonie des tâches à accomplir, la possibilité de faire reconnaître sa contribution à la production, la qualité des relations au sein des collectifs de travail et avec la hiérarchie, les possibilités de promotion, les marges d'autonomie et de responsabilités, la possibilité de réaliser un travail de qualité, les difficultés à gérer simultanément les exigences de vitesse et de qualité, l'inquiétude sur l'avenir. Des hypothèses de liens, par des voies endocriniennes, entre le stress et les TMS sont de plus en plus évoquées. Les situations de travail perçues négativement seraient susceptibles de générer des désordres à la fois physiques et psychologiques.

- Troubles

Les TMS affectent principalement les muscles, les tendons et les nerfs, c'est-à-dire des tissus mous. Les TMS s'expriment par de la douleur mais aussi, pour ceux du membre supérieur, par de la raideur, de la maladresse ou une perte de force. Au niveau musculaire, la principale contrainte est la force. Cette contrainte peut engendrer une fatigue musculaire. Sur les tendons, les principales contraintes mécaniques qui s'exercent sont les forces de traction développées par le muscle lors des efforts musculaires ainsi que des frottements et des compressions contre des tissus adjacents. Pour les nerfs,

la compression est la principale contrainte mécanique. La pathologie la plus répandue est le syndrome du canal carpien.

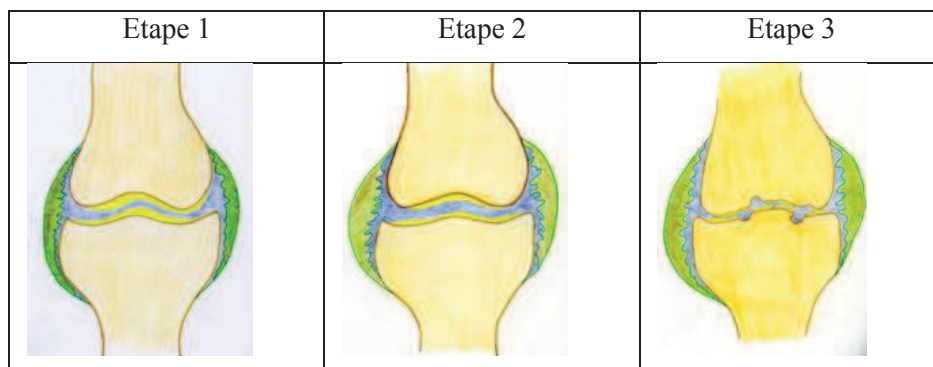
*TMS et conduite automobile*

Les personnes atteintes de TMS ne disposent pas de véhicules adaptés. Cependant, les douleurs contraignent fortement le mouvement de tourner le volant.

## 5/Polyarthrite rhumatoïde

- Définition

La polyarthrite rhumatoïde (PR) est un rhumatisme inflammatoire chronique. La synoviale (membrane qui tapisse l'intérieur de la cavité articulaire) sécrète une quantité trop grande de liquide synovial, qui s'accumule et enflamme l'articulation. La membrane gonfle et l'articulation devient douloureuse (Fig. 30).



**Fig. 30: Evolution de la PR.**

**Etape 1 : inflammation de la synoviale**

**Etape 2 : hypertrophie de la synoviale avec multiplication des franges ; amincissement du cartilage ; épanchement de liquide synovial**

**Etape 3 : poursuite de l'amincissement du cartilage et développement d'ulcérations osseuses.**

- Les causes

Les causes de la polyarthrite sont diverses. Elle peut être due à : des facteurs psychologique, dans 20-30% des cas, des facteurs hormonaux (prédominance chez la femme), des facteurs environnementaux, des facteurs génétiques. Cependant, d'après la Société Française de Rhumatologie, aucun de ces facteurs ne peut déclencher à lui seul la maladie. Il est probable que ce soit l'accumulation de plusieurs de ces facteurs qui en soit la cause.

- Troubles

L'évolution de la PR se fait par poussée, dont la durée est variable. L'articulation grossie et devient douloureuse. Après plusieurs années d'évolution apparaissent les déformations caractéristiques, secondaires à la destruction articulaire et à l'atteinte tendineuse (Fig. 31). La maladie entraîne alors une perte de la dextérité.



**Fig. 31: Exemple de polyarthrite rhumatoïde de la main.**

La PR peut également entraîner des raideurs des articulations qui entraînent des difficultés à se mouvoir. Elle se manifeste souvent de façon symétrique, affectant les mêmes articulations des deux côtés du corps. Ceci la distingue de l'arthrose (dégénérescence du cartilage articulaire) qui elle, affecte les articulations d'un seul côté à la fois.

*PR et conduite automobile*

La PR contraint le mouvement et impose la mise en place d'une aide à la conduite afin de palier à la faible amplitude articulaire.

Toutes ces pathologies limitent et rendent difficile le geste de tourner le volant. Elles peuvent pousser certains conducteurs à arrêter d'utiliser leur voiture. Or le besoin de mobilité est l'un des 5 besoins fondamentaux exprimé par la personne âgée et/ou handicapée dans le rapport ALCIMED (Etude Prospective sur les Technologies pour la Santé et l'Autonomie, étude effectuée à la demande de l'Agence Nationale de la Recherche et de la Caisse Nationale de Solidarité pour l'Autonomie, Octobre 2007) et l'automobile répond à ce besoin. Pour cela, il existe des aides à la conduite.

**Annexe 4** : Les études EMG de la tâche de conduite

Cette annexe présente les études EMG s'intéressant au taux et au délai d'activation musculaire et à la fatigue musculaire pendant la tâche de tourner le volant.

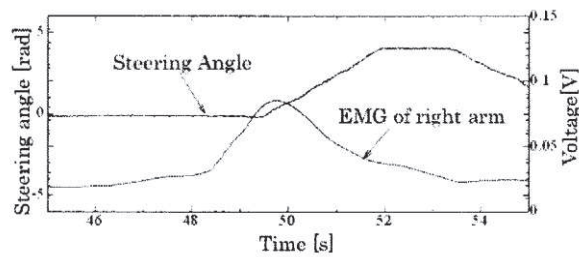
Dans leur étude, Pennestri, Stefanelli et al. (2007) élaborent un modèle musculo squelettique qui simule l'activité musculaire et les efforts inter articulaires pendant la conduite pour tester des aménagements ergonomiques du poste de conduite. Ce modèle est élaboré à partir d'une expérimentation sur un sujet sain et a pour domaine d'application la conduite d'un public handicapé. Le protocole vise à mettre en évidence l'ordre dans lequel les muscles sont recrutés ainsi que leur niveau d'activation, lors d'une rotation complète du volant à l'aide d'une boule. Le volant du simulateur est équipé d'un encodeur angulaire optique qui permet d'estimer le déplacement angulaire du volant. Les auteurs ont montré que pour un angle de rotation de 90° par rapport à la position initiale du volant (volant à 0° avec la main droite sur le volant à 3h), les muscles de l'épaule, trapèze et supra-épineux ont un taux d'activation maximum (20 à 25% de leur force max). Comme Pick and Cole (2006 (a)), ils remarquent une action du muscle antagoniste pour contrôler le geste de tourner le volant. Cette activation est toujours plus faible que celle du muscle effecteur (environ 10% de la force max.) et est proportionnelle à la décélération du bras.

Pour étudier la fatigue, Balasubramanian and Adalarasu (2007) n'instrumentent pas le volant. Ils comparent uniquement le niveau de fatigue musculaire chez des sujets experts en conduite automobile et des sujets novices à partir des électrodes EMG. Les électrodes sont placées perpendiculairement aux fibres musculaires, sur trois muscles du dos et du bras (Fig. 20) : le splénius de la tête, le trapèze et le deltoïde médian. Encore une fois, dans cette étude le geste du sujet est fortement contraint. Les sujets choisissent leur position au volant et restent dans cette position durant les 15 min de l'expérimentation. En fin d'expérimentation, les auteurs remarquent une fatigue musculaire plus importante sur le deltoïde droit, le trapèze droit et gauche.



**Fig. 32 : Instrumentation d'un sujet lors d'un geste de tourner le volant (Balasubramanian & Adalarasu, 2007).**

L'EMG permet également de déterminer le délai temporel entre la sollicitation du muscle et le moment où le volant tourne (Fig. 33). Ce temps varie selon le muscle observé. Il augmente en fonction de l'instant où celui-ci est recruté dans la tâche de tourner le volant (Matsugaura, Nishimura et al. 2005).



**Fig. 33 : Exemple du pic d'activation de l'EMG (en V) par rapport à l'angle au volant (en °).**



**Annexe 5** : Les avantages et inconvénients d'une analyse factorielle multivariée

A chaque articulation et à chaque segment sont associés des positions, vitesses, accélérations, forces, moments, selon les axes anatomiques, auxquels peuvent s'ajouter des signaux électromyographiques ou encore des données non temporelles, dans chacune des conditions expérimentales et pour chaque sujet. Les variables peuvent être directement mesurées (par exemple, la position d'un segment) ou calculées (par exemple, les efforts interarticulaires). Les signaux peuvent être de durées différentes et d'amplitudes variables. Avec la présence de plusieurs facteurs expérimentaux (souvent entre 2 et 5), la présence de nombreuses variables (souvent plusieurs dizaines), ainsi que les facteurs individuel et temporel, l'expérimentateur se trouve confronté à une base de données multifactorielles et multi variée. Cette base étant hétérogène (présence variables temporelles ou non, quantitatives ou non, ...) et de grande taille (plusieurs Giga-octets), son analyse ne peut être envisagée en une seule étape. Si, de manière classique, on se fixe comme objectifs principaux la recherche 1) des effets des facteurs sur les variables et 2) des relation inter-variables, une procédure générale en 5 étapes peut être proposée (Loslever, Guerra et al. 1997) :

**1. Caractérisation de données.** Elle est surtout mise en œuvre en présence de données temporelles dans la mesure où les signaux peuvent être traduits sous formes d'indicateurs plus ou moins synthétiques. Par exemple, dans le cas d'une variable continue, considérer une moyenne arithmétique est plus synthétique que découper la plage de variation en fenêtres spatiales puis de caractériser chaque fenêtre par une fréquence calculée pour la durée du signal, cette approche étant elle même plus synthétique que de combiner des fenêtres spatiales et des fenêtre temporelles (Loslever (2001));

**2. Codage des données.** Cette sous-étape peut être présente si les données ne sont pas compatibles avec les données requises par une méthode spécifique (par exemple, nécessité de passer par un tri par ordre croissant pour un test non-paramétrique) ou ne sont pas compatibles entre elles dans l'optique d'une analyse multivariée (codage par centrage-réduction avec une classification ascendante Hiérarchique (CAH) ou Analyse en Composantes Principales (ACP), découpage en fenêtres avec l'Analyse des Correspondances Multiples (ACM) (Sayarh 1991) (Sayarh (1991), (Chau 2001), Loslever (2001));

**3. Mise sous forme de tableaux de données.** Les méthodes ayant pour objectif d'atteindre les deux objectifs cités plus haut ont souvent comme entrée une matrice. Ceci étant, les données issues d'une étude empirique génèrent souvent plusieurs matrices, voire même plusieurs ensembles de données à plus de 2 entrées (notamment en présence de signaux multidimensionnels). En vue d'utiliser un logiciel statistique, une étape de « mise en forme » des données s'impose alors ;

**4. Etude des tableaux de données** (dans l'optique d'atteindre essentiellement les deux objectifs cités plus haut). Plusieurs dimensions taxinomiques peuvent être considérées pour distinguer les méthodes permettant une telle étude, par exemple 1) descriptif vs. inférentiel (soit on ne considère que les données disponibles, soit on déclare quelles proviennent d'échantillons et on cherche à extrapoler les résultats à la (les) population(s) dont ils proviennent) ; 2) mono vs. multivarié (en présence de  $V$  variables, on peut faire  $V$  analyses univariées ou une seule analyse à  $V$  variables) et 3) temporel vs. non

temporel (en présence de données temporelles, le facteur temps peut intervenir ou non dans le modèle mathématique). Combiner ces 3 dimensions taxinomiques à 2 modalités revient alors à distinguer 8 familles de méthodes (Loslever 2001);

**5. Présentation des résultats statistiques.** Les sorties issues des programmes informatiques utilisés dans l'étape précédente sont souvent difficiles à lire pour le non spécialiste (cas des nombreux tableaux et graphiques des méthodes multidimensionnelles factorielles ou des tests d'hypothèses avec plus de 2 variables en présence d'interactions). En conséquence, les sorties statistiques doivent être accompagnées de graphiques plus simples (Tufté 1983) ainsi que des textes venant commenter, sous le sens « physique », ces résultats.

Bien entendu, il est tout à fait possible que l'enchaînement considéré ci-dessus ne suffise pas. Il faut alors des bouclages. C'est notamment le cas en présence de données temporelles. Avec de telles données, on peut souvent démarrer l'exploitation statistique avec les méthodes de classification ou factorielles (Lempereur 2006; Ait El Menceur 2009). L'avantage des premières par rapport aux secondes réside essentiellement dans la facilité de lecture des résultats. C'est notamment le cas de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) qui fournit « simplement » un dendrogramme (ou arbre hiérarchique). En revanche l'inconvénient est que cet arbre est, soit construit sur les lignes d'un tableau à 2 entrées (souvent des situations empiriques), soit sur les colonnes (souvent des variables). Ce n'est pas le cas des méthodes factorielles qui, dans une même analyse, s'intéressent aux lignes et aux colonnes.

Un autre point intéressant des méthodes factorielles est la possibilité de considérer des éléments supplémentaires (Fig. 34). Il existe alors de nombreuses variantes comme l'ACP ou l'AFCM déjà mentionnées. Là aussi, un des points de distinction est la facilité à lire les sorties des programmes correspondants. Par exemple, en présence de  $V$  variables quantitatives, l'ACP fournit  $V$  points projetés dans des « cercles des corrélations » ; les positions relatives de ces points, entre eux et par rapport au cercle, indiquant l'intensité de la relation linéaire entre les variables correspondantes. La possibilité de découper chaque variable en  $S$  fenêtres permet alors de montrer des relations autres que linéaires, générant alors des trajectoires à  $S$  points plutôt qu'un point par variable. Les données issues du découpage sont alors des valeurs d'appartenance aux fenêtres qui peuvent être étudiées via l'AFCM. Bien entendu, les résultats sont nettement plus complexes à lire que ceux de l'ACP. Néanmoins cet inconvénient est contrebalancé par la possibilité d'étudier des variables qualitatives et quantitatives ainsi que de perdre moins d'informations dans le cas où des moyennes (sur des individus, des échantillons temporels, ...) sont à calculer. Par exemple, si on considère des paires de notes, 1 et 19 donnent la même moyenne arithmétique que 8 et 12 (en l'occurrence 10). Le découpage va donner des résumés différents. Par exemple, si on considère 4 fenêtres rectangulaires de largeurs égales ( $[0,5[$ ,  $[5,10[$ ,  $[10,15[$  et  $[15,20[$ ), et si on traduit par 1 le fait qu'on appartient à la fenêtre et 0 sinon, la première 0 produit  $[1,0,0,0]$  comme série de valeurs d'appartenance à ces 4 fenêtres, 20 donne  $[0,0,0,1]$ , 9 donne  $[0,1,0,0]$  et 11 donne  $[0,0,1,0]$ . Si on veut résumer les notes de 1 et 19, on obtient le quadruplet  $[\frac{1}{2}, 0, 0, \frac{1}{2}]$ , on garde donc l'idée qu'une note était très faible et l'autre très forte, alors que résumer 8 et 12 donne  $[0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0]$ . Bien entendu, la perte d'informations peut encore être réduite si on prend un découpage flou (Zadeh 1965; Loslever 2001). Les tableaux de valeurs d'appartenance offrent donc un intérêt indéniable pour une analyse exploratoire en présence de plusieurs facteurs et

variables (Bouilland 1997; Loslever 2001). En outre, le découpage en fenêtres spatiales reposant sur une analyse méticuleuse des histogrammes, il devient possible de détecter des données douteuses. Cette possibilité est également de mise avec l'observation des positions des points lignes et des points colonnes des tableaux soumis à une méthode multidimensionnelle. Evoquer ici un point très peu relaté dans la littérature (quelle soit de type statistique ou biomécanique) concernant cette faculté de détecter des données douteuses peut sembler curieux ; néanmoins, l'analyse statistique de multiples variables mesurées et calculées montre que des erreurs peuvent s'être glissées ici ou là. De telles erreurs sont peu détectables avec une démarche reposant sur des tableaux d'indicateurs très synthétiques ou des tests d'hypothèses.

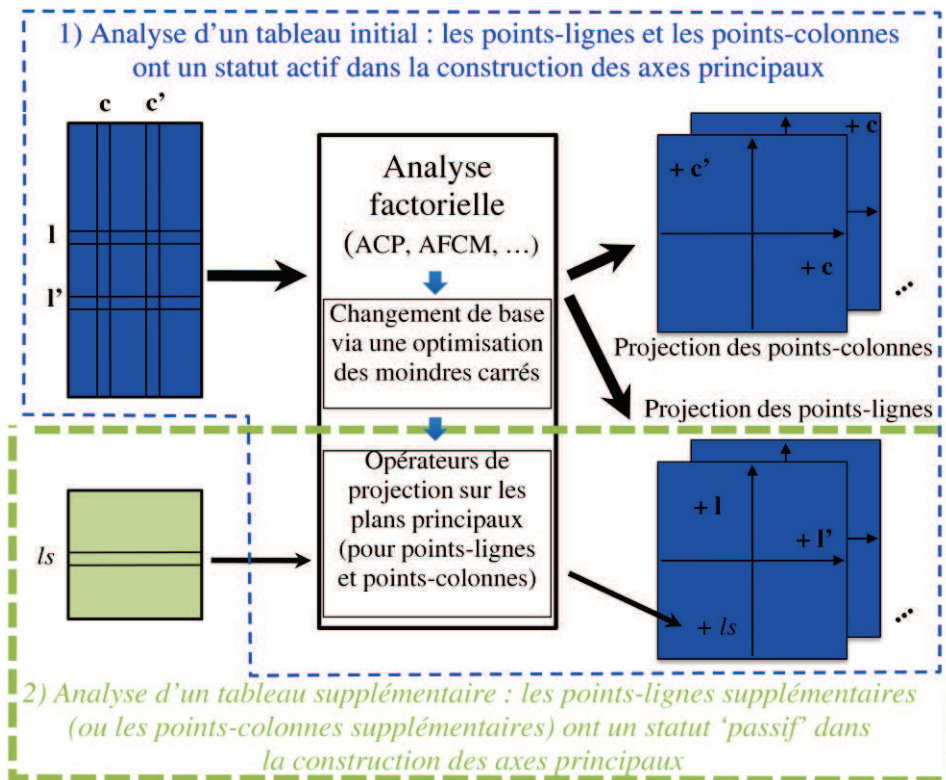


Fig. 34: Un point intéressant des méthodes factorielles : possibilité de considérer des points mis en « supplémentaire » (ou « en illustratif»). Le cas montré ici concerne les points-lignes.



---

## **CHAPITRE 2**

### **PROTOCOLE ET DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL TRAITEMENT DES DONNEES**

---

## 1. Introduction

Suite aux observations de conducteurs pathologiques du centre de rééducation Calvé de la fondation Hopale de Berck-sur-mer, et à l'étude bibliographique du chapitre 1, la plateforme expérimentale doit permettre la mesure de/des :

- Positions des mains sur le volant afin d'analyser les stratégies de poses de mains.
- Efforts de contact mains/volant afin de comprendre l'action de chaque main pendant le geste.
- L'activité électrique des principaux muscles impliqués afin de repérer les patterns d'activation et le niveau de fatigue musculaire des conducteurs.
- l'avis des conducteurs afin d'étudier leurs ressentis lors de la tâche de tourner le volant.
- mouvement des membres supérieurs qui couplé aux efforts au volant permettent par ailleurs le calcul des efforts articulaires pour les articulations du membre supérieur

Ces données doivent être acquises lors d'un exercice de manœuvres à basse vitesse afin d'inciter les conducteurs à tourner le volant.

Dans la première partie de ce chapitre, le protocole et le dispositif expérimental sont présentés. Pour les besoins de l'étude, une maquette automobile, une interface visuelle, des caméras optoélectroniques et des capteurs EMG sont utilisés. La maquette automobile dispose d'un volant à retour d'effort instrumenté de dynamomètres 6 composantes autorisant la mesure des efforts appliqués par chacune des mains. L'interface visuelle simule des manœuvres à basse vitesse. Elle est conçue en 2D dans l'idée de pouvoir comparer les gestuelles des conducteurs. Le protocole expérimental est ensuite développé. La maquette et l'interface visuelle ont été validées par des pré-expérimentations. Dans la seconde partie, les méthodes utilisées pour exploiter les données cinématiques (i.e. angle articulaire, position 3D, etc.) sont précisées, de la labellisation des données brutes sous Vicon® à la création des repères locaux liés aux articulations des membres supérieurs.

## 2. Dispositif expérimental et protocole

### 2.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental se compose d' :

- une maquette automobile,
- une interface visuelle,
- un volant instrumenté original,
- un système Vicon MX T020,
- un système EMG Zerowire, Aurion.

Cette première partie présente ces différents matériels. Seules les données cinématiques et dynamiques sont exploitées dans la thèse. L'utilisation de l'EMG est renvoyée en perspective chapitre 5.

### 2.1.1. Maquette automobile

Une maquette compacte a été conçue pour l'analyse du geste de tourner le volant à partir d'une Peugeot 206, 3 portes, transformée par l'équipe technique du LAMIH. La partie avant du véhicule (2 sièges + capot) a été conservée. Le toit ainsi que les portières ont été enlevés. La carrosserie a été poncée et repeinte. Le matériel électronique est logé dans le compartiment moteur débarrassé de toute mécanique. La maquette est fixée à un châssis métallique pour son transport et sa verticalisation (Fig. 35).



Fig. 35 : Maquette automobile compacte sur son châssis métallique

Sous le capot sont installés un bornier d'acquisition National Instrument (1), une MicroautoBox (2), une batterie (3) et un vidéo projecteur (4) pour la projection des scénarii sur un écran situé à un mètre du véhicule (Fig. 36a). L'image projetée fait 1,25m de haut pour 2m de large. L'équipement de l'habitacle est d'origine, le levier de vitesse et le frein à main sont conservés. Le pédalier est également présent de manière à ce que la posture assise du sujet soit la plus proche de sa position de conduite réelle. Des accoudoirs sont ajoutés afin d'augmenter le confort du conducteur. Des équipements amovibles, de type fourche ou boule, sont disponibles pour les personnes conduisant d'une main. La maquette est entièrement modulable : les sièges s'avancent, se reculent et s'inclinent, le volant est réglable verticalement. Toutes les arrêtes tranchantes du véhicule ont été polies et recouvertes d'un joint de protection (Fig. 36b).

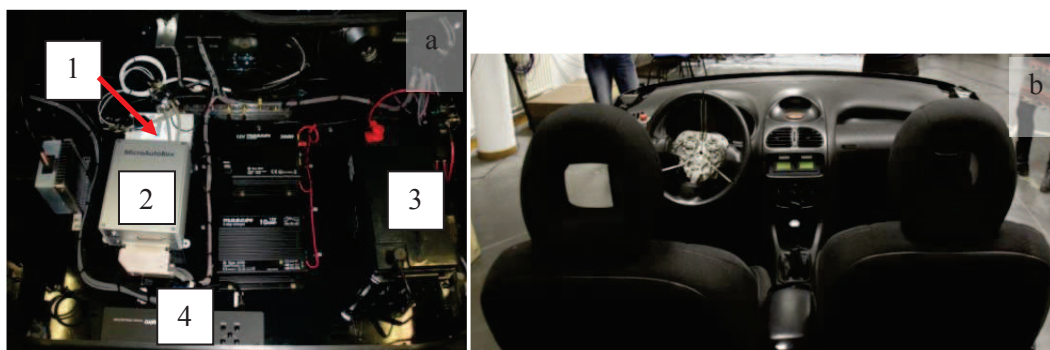
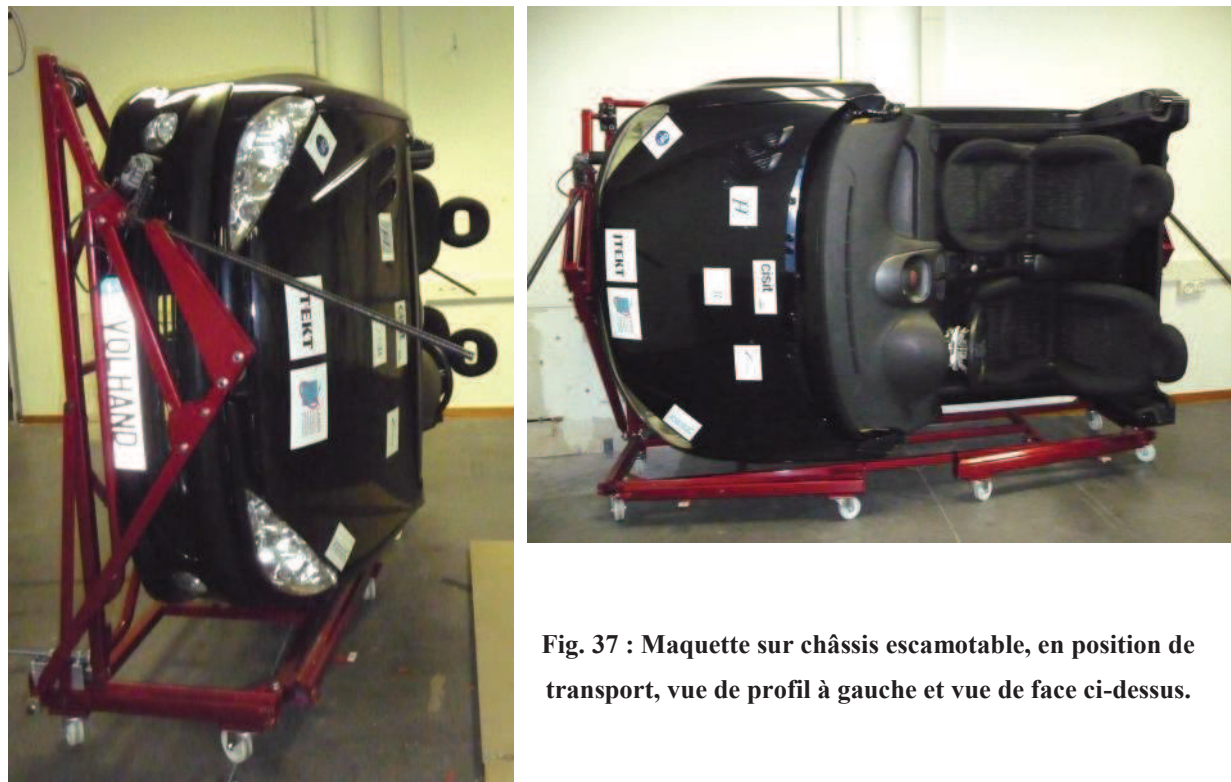


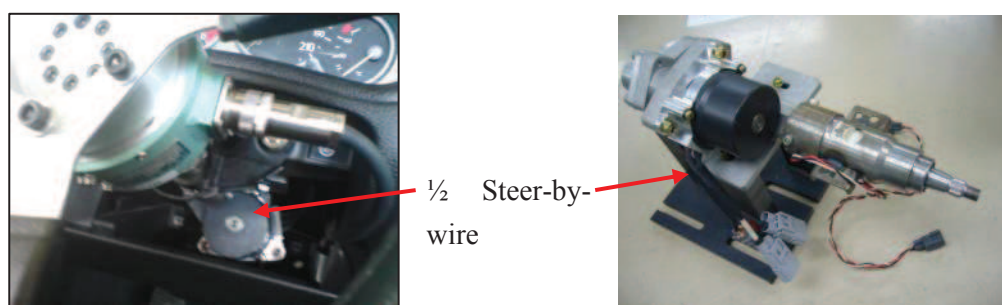
Fig. 36 : a/ Aménagement du compartiment moteur de la maquette et b/ habitacle d'origine de la 206

La maquette automobile est installée sur un châssis escamotable, conçu de manière qu'une seule personne puisse la mettre en position verticale et ainsi faciliter son déplacement. En mode transport, la maquette mesure 105 cm de large et 190 cm de haut. En position de test, la maquette est remise à l'horizontale, châssis et roulettes de transport verrouillées (Fig. 37).



**Fig. 37 : Maquette sur châssis escamotable, en position de transport, vue de profil à gauche et vue de face ci-dessus.**

Pour augmenter le rendu proprioceptif, le retour d'effort au volant est appliqué sous la forme d'un couple résistant. Ce système calcule l'effort produit par le contact pneu/chaussé, simule l'assistance, et applique le couple résistant résiduel, à l'aide d'une  $\frac{1}{2}$  steer-by-wire JTEKT (Fig. 38). Le calcul s'effectue à partir du couple conducteur et la vitesse véhicule simulée. La position angulaire du volant est une variable de sortie du système de retour d'effort.



**Fig. 38 : A gauche, montage de la  $\frac{1}{2}$  steer-by-wire, à droite la  $\frac{1}{2}$  steer-by-wire démontée**

La maquette ainsi que le volant sont équipés de marqueurs (Fig. 39). Trois marqueurs sont disposés en triangle sur les 3 branches du « T » central du volant. Ils définissent, après calcul, le repère volant utilisé pour l'étude des interactions main/volant. Les marqueurs présents sur la maquette (colorés en rouge sur l'image) permettent de visualiser l'espace de mesure.





**Fig. 39 : Position des marqueurs sur la maquette (en rouge) et sur le volant (en blanc)**

Enfin, un volant original complète cette maquette automobile. Ce volant permet d'enregistrer les efforts mains/volant pendant la conduite. Le paragraphe suivant présente ce volant instrumenté, dit V3B.

### **2.1.2. Volant instrumenté V3B**

Le volant est instrumenté pour connaître les efforts exercés par chacune des mains sur le volant. La connaissance des efforts mécaniques développés sur le volant par chaque main permet également le calcul des efforts interarticulaires. Le volant, spécialement conçu pour les besoins de l'étude, est appelé V3B (volant 3 branches). Il se compose d'un arceau central découpé en trois parties. Les branches de chacune des parties sont fixées à un dynamomètre, permettant de mesurer l'effort (force et moment) appliqué sur chaque branche (Fig. 40). Les branches réunissant les trois « arceaux » du volant sont doublées afin d'éviter sa déformation lors de son utilisation. Un revêtement recouvre ces arceaux pour masquer les découpes du volant au conducteur. Enfin, la disposition des branches du volant est identique au volant normal (Fig. 41).

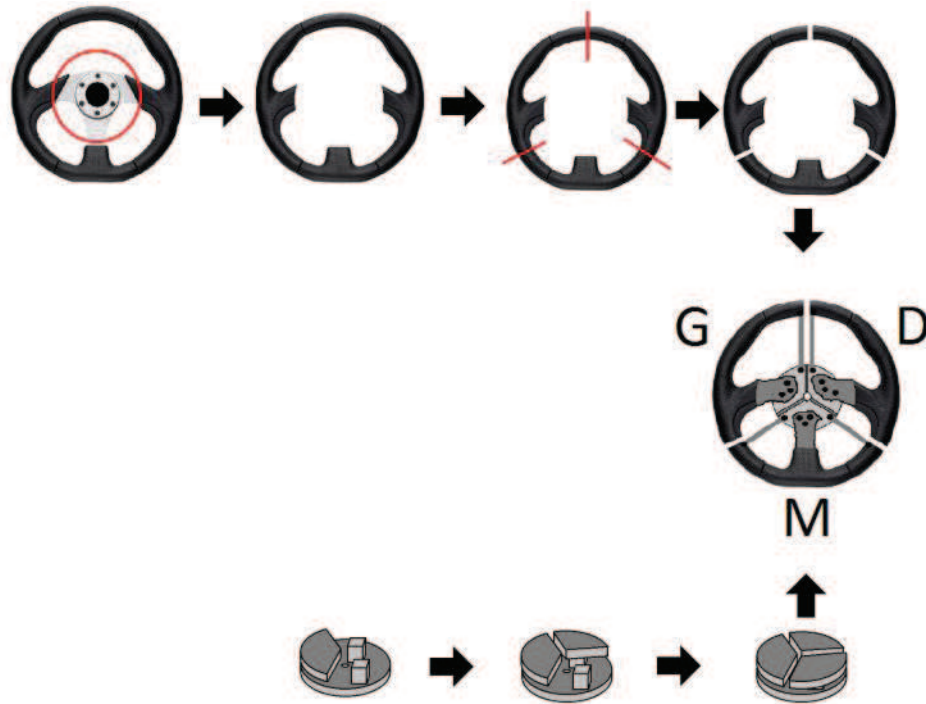


Fig. 40: Le volant d'origine est découpé en trois. Chaque tiers est fixé à un dynamomètre à 6 composantes, avec G pour Gauche, D pour Droite et M pour Milieu (Gabrielli, Pudlo et al. 2012 (a)).

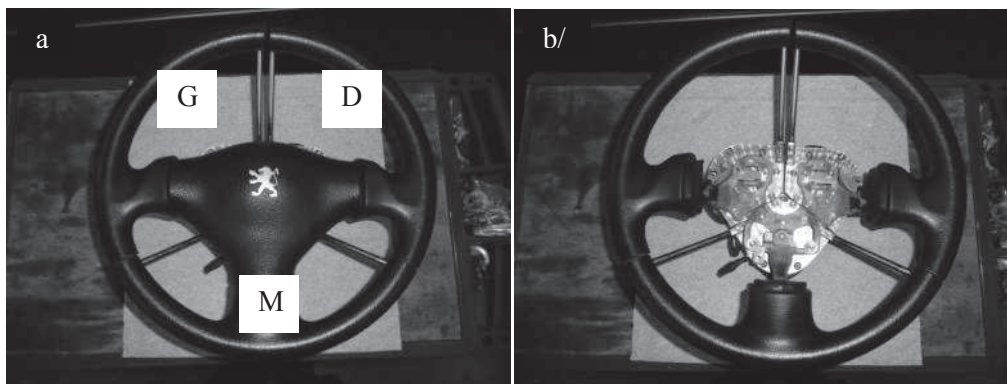


Fig. 41 : Le volant instrumenté V3B: a/ avec le cache Peugeot du volant d'origine et b/ sans le cache.

Des différences subsistent néanmoins. La Fig. 42 résume les principales différences entre ce volant et le volant d'origine.



Propriété mécanique :

Masse : 1,43kg

Diamètre : 38 cm

Section de l'anneau : 3,2 cm

Moment d'inertie : 310kg.cm<sup>2</sup>



Propriété mécanique :

Masse : 3,5 kg

Diamètre : 37 cm

Section de l'anneau : 3,2 cm

Moment d'inertie : 390kg.cm<sup>2</sup>

Fig. 42 : Le volant d'origine VO à gauche et le volant instrumenté V3B à droite

Nous renvoyons le lecteur à l'article de Gabrielli, Pudlo et al. (2012 (a)) pour plus d'informations. Le lecteur y trouvera en particulier la calibration de ce nouveau dispositif de mesure.

### 2.1.3. Interface visuelle

L'interface visuelle est 2D et affiche l'angle au volant que le conducteur doit suivre. Ce choix est retenu car il limite la dispersion des trajectoires entre les sujets (Cf. Chap. 1, §6.2) et permet leur comparaison sur une tâche similaire. Ces angles fonction du temps sont enregistrés après des essais menés sur le véhicule hybride du LAMIH. Ce véhicule embarque une cellule d'acquisition dédiée permettant d'enregistrer en temps réel les paramètres suivants :

- Position GPS du véhicule, donnant ses coordonnées (longitude, latitude) en mètre
- Vitesse du véhicule
- Angle du volant

Ces angles ont été acquis à 100 Hz sur le campus du Mont Houy de l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, lors d'une conduite à basse vitesse (environ 30km/h). Le signal de l'angle au volant enregistré est découpé et sous échantillonné à 25Hz. (Fig. 43). Le découpage permet d'isoler les virages élémentaires (rond point, sortie de parking, etc...). La base de données finale contient 50 virages différents.

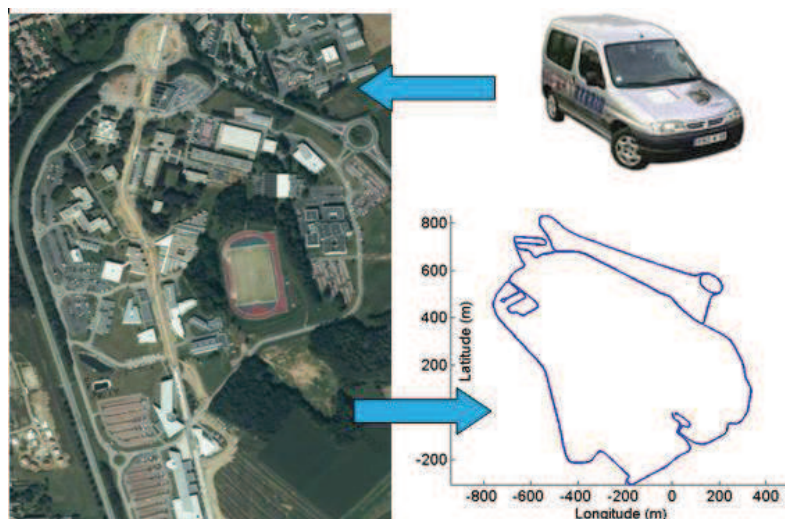
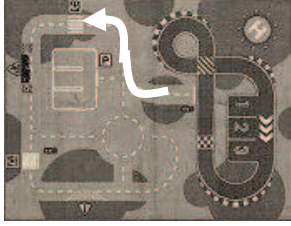
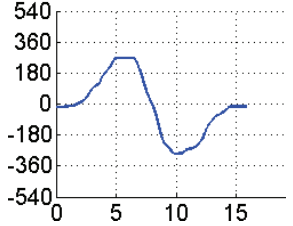
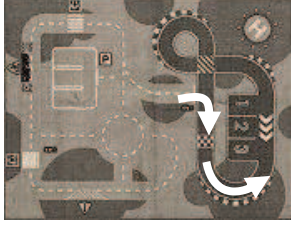
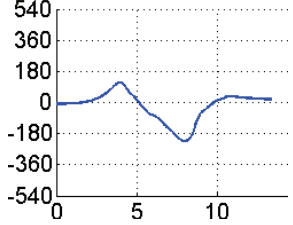
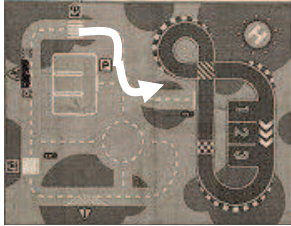
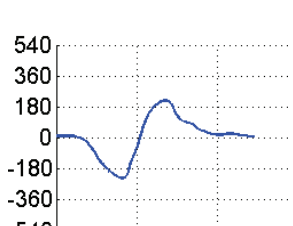
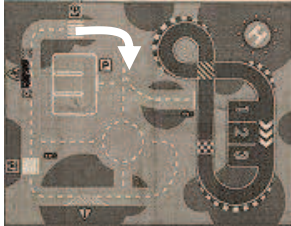
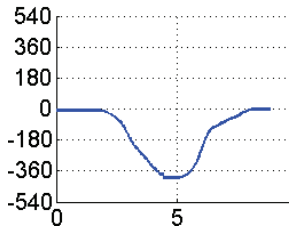
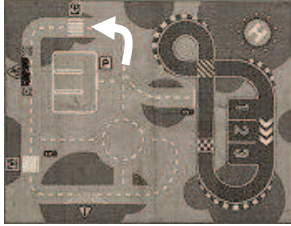
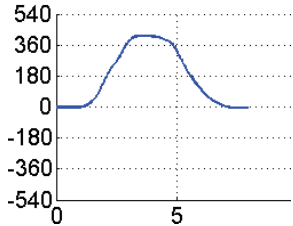
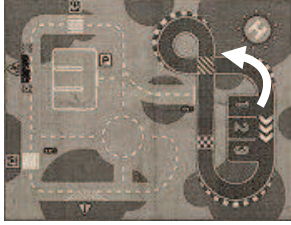
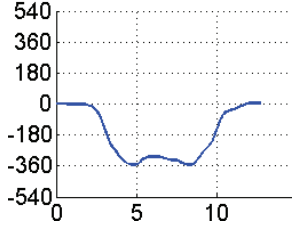
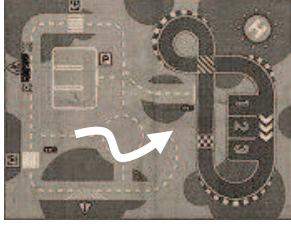
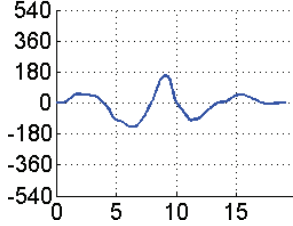


Fig. 43 : Véhicule hybride du LAMIH (haut droit), vue aérienne du campus (à gauche), parcours réalisé (bas droit).

Seuls 10 virages de la base de données sont sélectionnés pour l'étude (Tableau 9). Ils sont utilisés pour la création des scénarii des premières expérimentations (§ 2.2) et du protocole expérimental (§ 2.3).

Tableau 9 : Base de données des 10 virages retenus.







Numéro de virage	Description	Image route	Image virage (angle au volant)
1	Rond point 90/120/90		
2	Longue courbe gauche 300		
3	Rond point 150/270/90		

4	Droite gauche 270/270		
5	Droite gauche 90/180		
6	Gauche droite 200/200		<p>3</p> 
7	Virage simple droite 90		
8	Virage simple gauche 90		
9	Longue courbe droite 360		
10	Petit rond point 140/180/90		

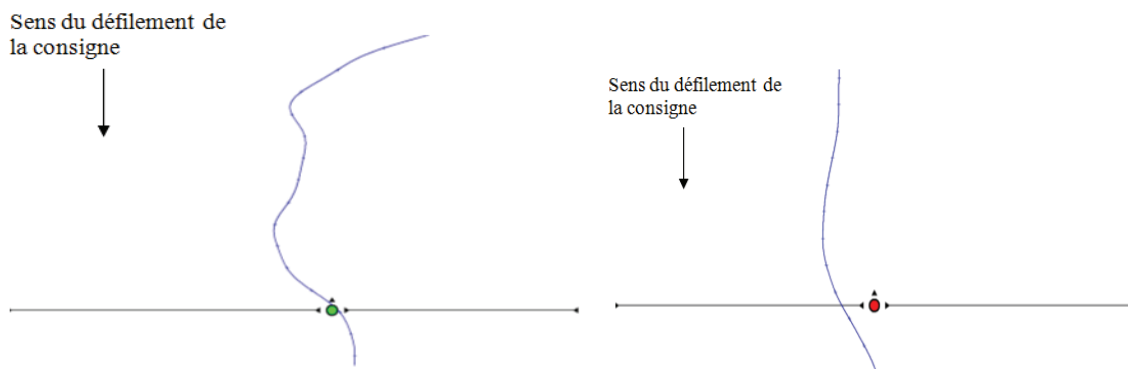
Les virages sont mis à la suite les uns des autres séparés par des lignes droites, ainsi le conducteur revient en position initiale après chaque virage (angle du volant à 0°). Cet enchaînement est projeté en 2D et matérialisé par une ligne défilante, à vitesse constante, du haut vers le bas. Elle correspond à la vitesse moyenne d'un véhicule roulant à 22km/h. Par la suite, cet enchaînement est appelé scénario.

La position angulaire du volant est matérialisée par un curseur, sous forme d'une pastille verte. Lorsque le conducteur tourne le volant, cette pastille se déplace sur l'axe horizontal. Le Tableau 10 décrit ce principe :

**Tableau 10: Positions angulaires du volant et leurs représentations graphiques.**

Action du volant	Représentation linéaire du curseur
Position neutre (angle nul) 	
Tourner à droite 	
Tourner à gauche 	

La tâche proposée est une tâche de tracking. Le conducteur a pour consigne de suivre la trajectoire de l'angle au volant projeté en maintenant le curseur sur la ligne (Fig. 44a). Si le sujet dévie de la trajectoire imposée, le curseur change de couleur pour lui indiquer son erreur (Fig. 44b). Pour avoir un geste fluide de tourner le volant, une tolérance de +/-25° du volant est admise.



**Fig. 44: Virage projeté : a) à gauche, le curseur vert suit la trajectoire, b) à droite, le curseur devient rouge en s'éloignant de la trajectoire**

Un indice de performance est défini et vise à évaluer la capacité du sujet à suivre la consigne. Il est calculé à chaque période de rafraîchissement de l’affichage (25Hz). Il vaut 1 quand la pastille est verte, 0 sinon.

Le score de performance global est égal au rapport de la somme des indices où la pastille est verte sur chaque période de rafraîchissement, avec  $Tps(s)$  étant la durée du scénario en seconde (120):

$$I = \frac{\sum indice}{20 \times Tps(s)}$$

Ce score est compris entre 0 et 100%. Il permet de quantifier la réussite du sujet et de mettre en évidence les dispersions par rapport à la tâche à réaliser (angle au volant réalisé VS angle au volant demandé).

Pour vérifier que la consigne est réalisable par tous et qu’elle incite les conducteurs à tourner le volant une étude de validation a été menée (cf. §2.2.2).

#### 2.1.4. Caméras Vicon MX T020

Dix caméras sont utilisées pour l’expérimentation menée en laboratoire. Ces caméras sont disposées autour de la maquette automobile, câbles scotchés au sol (Fig. 45). La fréquence d’échantillonnage du système est de 100 Hz et sa résolution de 2 Méga Pixels. La position des caméras est optimisée de façon à ce que deux caméras voient toujours les marqueurs placés sur le sujet (et sur la maquette). De nombreux essais ont permis d’obtenir une disposition satisfaisante, limitant la perte des marqueurs durant l’expérimentation quel que soit le sujet.



Fig. 45 : Disposition des 10 caméras autour de la maquette automobile

L’ensemble des matériels (maquette, caméras Vicon®) est installé à l’avance et la zone d’expérimentation est calibrée chaque jour. La calibration se déroule en deux temps : une calibration dite statique et une calibration dite dynamique. La calibration statique vise à définir un repère orthonormé direct lié au laboratoire (appelé  $R_v$ , repère Vicon, par la suite) à l’aide d’une équerre

visible par au moins 2 caméras. La calibration dynamique se fait à l'aide d'une baguette en forme de T, déplacée dans le volume de travail désiré (Fig. 46). Elle a pour objectif de calibrer l'espace de travail et de déterminer la position de toutes les caméras dans le repère Vicon (Cf. la documentation Vicon® pour davantage de précisions).



**Fig. 46: Baguette de calibration des caméras Vicon®**

Deux caméscopes numériques de type JVC Digital Video Camera de 1.6MP sont utilisés lors des pré-expérimentations. Un seul sera utilisé dans le protocole définitif afin d'apporter un support visuel, utile pour les analyses postérieures et la vérification des stratégies de mouvement. Les caméscopes, placés dans le dos de part et d'autre du conducteur, filment le mouvement des mains.

### **2.1.5. Système EMG Zerowire**

Il est utilisé pour mesurer l'activité électrique des différents muscles des membres supérieurs lors de la conduite automobile (cf. Chap. 1, §3.2.2). C'est un système sans fil (Fig. 47) et non-invasif. Les électrodes jetables pré-gélifiées sont collées directement sur la peau nettoyée et dégraissée au préalable. Les compresses, ainsi que les électrodes utilisées, sont à usage unique. La fréquence d'échantillonnage du système est de 2 000 Hz.



**Fig. 47: Système EMG Zerowire, AURION**



## **2.2. Premières expérimentations de validation du dispositif expérimental**

Des premières expérimentations ont été menées pour valider l'interface visuelle et le volant V3B :

- L'interface visuelle est supposée validée si elle est réalisable par tous (i.e. si le score de performance calculé (§ 2.1.3) dépasse 80%) et si elle permet de mettre en évidence plusieurs stratégies de positions de mains, comme présenté au chapitre 1, § 3.1 (Schiro, Gabrielli et al. 2011).
- Le volant V3B est supposé validé si le ressenti et le score de performance (§2.1.3) sont équivalents à ceux obtenus avec le volant d'origine.

Ces premières expérimentations ont consisté à filmer les mains des sujets pour un scénario de conduite à basse vitesse construit à partir des 10 virages sélectionnés dans la base de données (§ 2.1.3). La maquette automobile (§ 2.1.1) et le volant V3B (§ 2.1.2) ont été utilisés. Dans une première partie, le protocole expérimental est décrit. Les résultats sont présentés dans une deuxième et troisième partie.

### **2.2.1. Protocole des premières expérimentations**

La population est représentative de la population retenue pour les expérimentations (cf. § 2.3). Trois groupes de 8 personnes sont constitués :

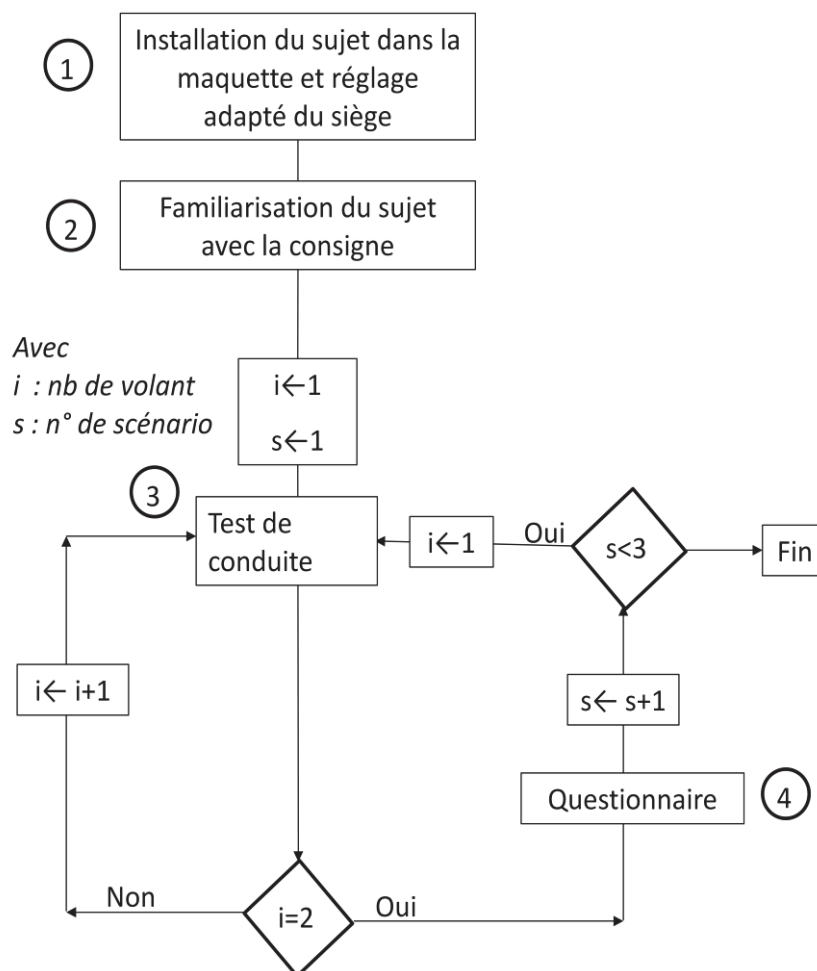
- Sujets sains (GS), de 18 à 50 ans
- Sujets âgés (GA) actifs<sup>10</sup> de plus de 65 ans, qui conduisent encore et sans problèmes moteurs particuliers.
- Sujets pathologiques (GP) de 18 à 90 ans, avec des déficiences motrices aux membres supérieurs. Les sujets ayant des douleurs articulaires et/ou musculaires aux membres supérieurs, entrent dans cette catégorie.

Les sujets sont des conducteurs, mixtes, titulaires du permis de conduire B. Ils sont recrutés au sein du LAMIH/UVHC et à Valenciennes. Les expérimentations se déroulent dans les locaux du LAMIH pour les trois groupes.

Le protocole de déroulé de la façon suivante (Fig. 48) :

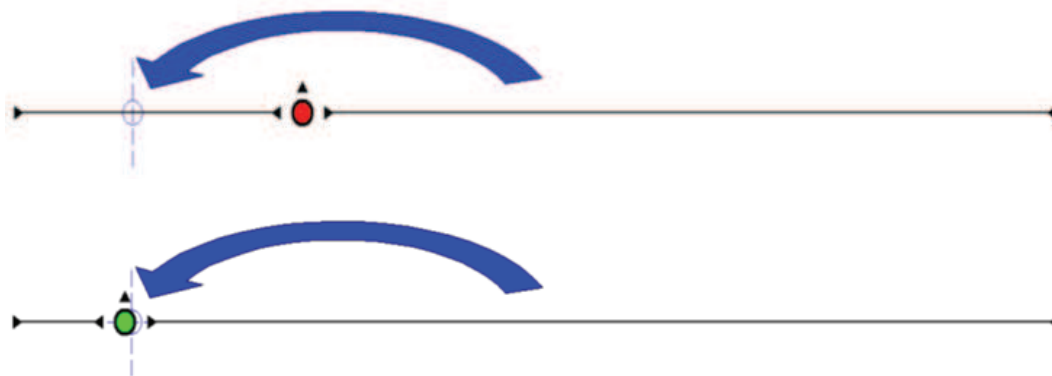
---

<sup>10</sup> Qui est autonome, se déplace seul sans aides matérielles et humaines.



**Fig. 48 : Déroulement du protocole, avec  $i = 1$  le volant d'origine VO (respectivement V3B) avec  $i=2$  le volant V3B (respectivement VO) et  $s$  le n° de scénario (S1 ou S2)**

- ① Les sujets sont accueillis par l'équipe, une fiche descriptive du protocole ainsi qu'une demande de consentement sont fournies (Annexe 1). Après avoir pris connaissance de ces informations, le sujet s'installe dans le siège conducteur de la maquette.
- ② Un didacticiel d'apprentissage est proposé au sujet pour qu'il se familiarise avec la consigne. Cet apprentissage se déroule en plusieurs étapes :
- Présentation de l'interface graphique, explication du code couleur associé au curseur symbolisant la position du volant. Le sujet est libre d'effectuer quelques mouvements afin d'appréhender le dispositif expérimental.
  - Une série de plusieurs cibles est présentée au sujet. Le sujet doit alors les atteindre en tournant le volant. Les cibles sont placées à distances variables, ce qui oblige le sujet à effectuer des rotations du volant représentatives d'une situation de conduite (Fig. 49). La giration va de un quart de tour à un tour et demi. Une dizaine de cibles est présentée, une fois que toutes ces cibles sont atteintes, le didacticiel passe à l'étape suivante. Le code couleur utilisé pour les cibles est identique aux couleurs du curseur utilisées pour le parcours : vert, le geste est « bon », rouge, le geste ne satisfait pas la consigne.



**Fig. 49: Test d'apprentissage simulation de créneau**

La deuxième partie de l'apprentissage initie le sujet au futur scénario de conduite. Six virages de difficulté croissante sont présentés (Fig. 50, Fig. 51, Fig. 52). Le sujet a pour consigne de maintenir la pastille sur la trajectoire bleue. Pour lui faire appréhender le code couleur choisi, il est invité à tourner son volant de part et d'autre de la ligne : lorsqu'il sort de la tolérance imposée (entre les deux petits triangles noirs) la pastille devient rouge. Le passage au virage de difficulté supérieure<sup>11</sup> est déclenché dès que le sujet obtient un score de performance supérieur à 80%. Ce seuil a été déterminé lors d'essais préliminaires menés sur un échantillon représentatif de la population. Le sujet n'est pas été informé de son score afin de ne pas ajouter de stress lié à une notion de réussite. Par contre, il permet, aux expérimentateurs, de contrôler si le sujet a réalisé la tâche correctement.

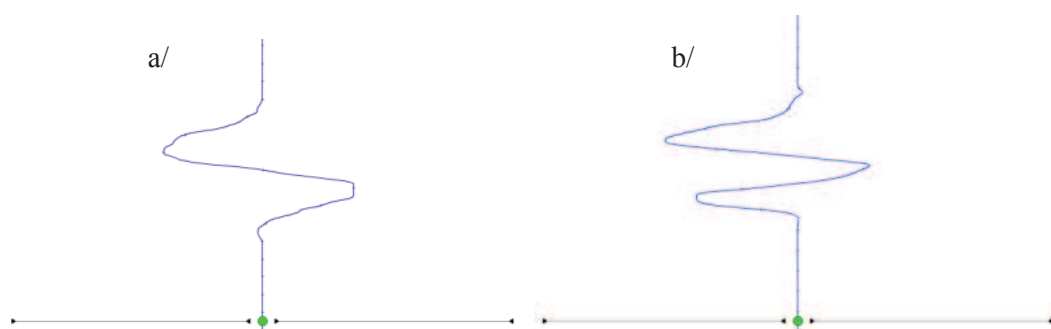


**Fig. 50: a/ Configuration de d'angle au volant simple à droite et b/ droite / gauche**



**Fig. 51: a/ Configuration d'angle au volant de type petit giratoire et b/ gauche / droite.**

<sup>11</sup> Les figures 50 à 5 présentent les virages dans leur ordre croissant de difficultés.



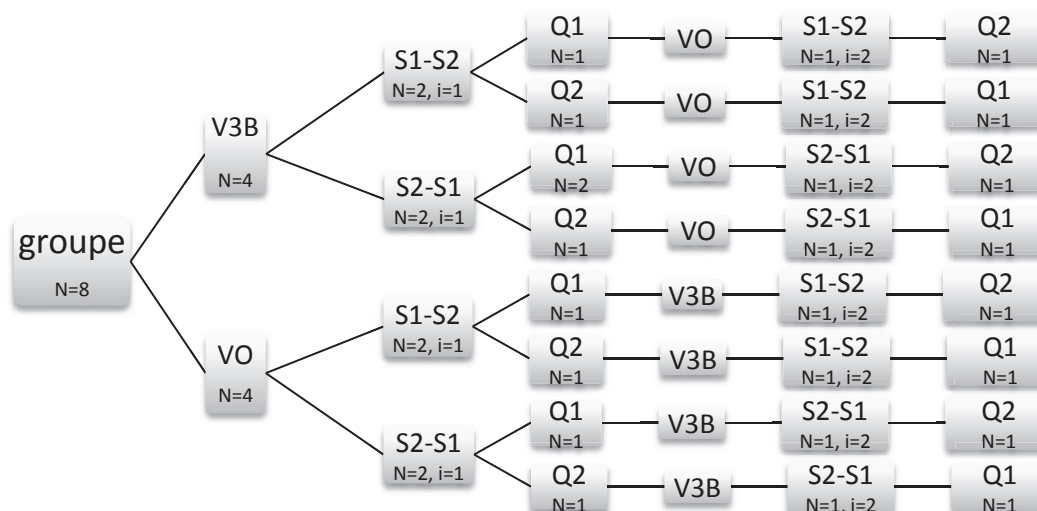
**Fig. 52: a/ Configuration d'angle au volant de type droite-gauche et b/ droite-gauche-droite de grande amplitude**

Le temps d'apprentissage est limité à 5 minutes, cependant si le sujet effectue le didacticiel sans difficulté, ce temps peut être écourté. Cette phase doit permettre au sujet d'acquérir l'expérience nécessaire à effectuer le scénario de conduite. C'est à la fois un didacticiel et un outil de la mesure de la performance du sujet, à l'aide du score de performance.

③ Après cette phase d'apprentissage, le conducteur réalise un test de conduite. Les 10 virages sélectionnés pour l'étude ont permis de développer deux scénarii (S1 et S2). S1 se différencie de S2 par la distribution de ses virages (Tableau 9) :

- Ordre des numéros de virages du scénario 1 (S1) : 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10
- Ordre des numéros de virages du scénario 2 (S2) : 8-1-5-9-10-7-4-8-2-3

Chaque scénario est proposé 2 fois (une fois avec le V3B et l'autre avec VO) aux sujets, dans un ordre contrebalancé<sup>12</sup>. La Fig. 53 présente le plan d'expérience :



**Fig. 53 : Plan d'expérience avec N= nombre de sujets et i= numéro de répétition de l'enchaînement des scénarios 1 (S1) et 2 (S2), Q1 le questionnaire avec l'ordre de question n°1, Q2 le questionnaire avec l'ordre de question n°2, VO le volant d'origine et V3B le volant 3 branches.**

<sup>12</sup> C.-à-d., jamais dans le même ordre entre les sujets d'un même groupe.

Dans un groupe (N=8), 4 sujets débutent avec le volant V3B et les 4 autres par le volant VO. Dans ces sous-groupes, 2 conducteurs commencent par le scénario S1 et répondent en premier lieu au questionnaire Q1 puis Q2. Entre chaque scénario de 3 minutes, le sujet fait une pause de 1 minute. Durant ces premières expérimentations le volant d'origine VO et le volant instrumenté V3B sont interchangés.

Pour mesurer le couple de rotation et l'angle au volant exécuté pendant l'exercice, un dynamomètre central est placé entre la  $\frac{1}{2}$  steer-by-wire et le volant. Un écran, sur lequel est projeté un scénario de conduite, est placé devant la maquette. Deux caméras numériques sur pied sont placées derrière, de chaque côté du véhicule (Fig. 54). Les caméras capturent alors les mains du conducteur ainsi que ses profils droit et gauche. Les deux mains sont repérées avec des scotchs de couleurs différentes. Une diode est installée sur le tableau de bord afin de synchroniser les caméras avec le scénario. Celle-ci s'allume au début et à la fin de la série de virages.



**Fig. 54 : Un sujet dans la maquette durant l'expérimentation**

④ Les questionnaires sont découpés en 2 parties : une partie « informations générales » et « informations sur le volant » (Annexe 2). La partie « informations générales » recueille des informations sur le conducteur (*i.e.* âge, poids taille, sexe...) et ses habitudes de conduite (nombre de km parcourus par an, nature des trajets réguliers...). La partie « informations sur le volant » évalue le ressenti du conducteur par rapport au volant autour de 4 items :

- le confort général du volant,
- les aspects visuels,
- les aspects perceptifs,
- les aspects moteurs.

Il existe 2 questionnaires. La partie « informations générales » est identique pour les deux questionnaires. Par contre l'ordre des questions présentées dans la partie « informations sur le volant » est différent pour éviter un effet d'ordre : un ordre pour le questionnaire 1 (Q1) et un autre ordre pour les mêmes questions dans le questionnaire 2 (Q2).

### 2.2.2. Validation de l'interface visuelle

Pour valider l'interface, deux hypothèses sont formulées :

- 1/ le suivi de la trajectoire est réalisable par tous, pour pouvoir comparer les sujets.
- 2/ l'angle au volant projeté permet de mettre en avant des stratégies de mouvement des mains différentes selon les conducteurs (*i.e.* les mains croisées ou non croisées, cf. chap. 1).

La première hypothèse est étudiée grâce au score de performance calculé (§ 2.1.3) et la seconde à partir de l'observation des vidéos enregistrées pendant l'exercice. Le score de performance permet de quantifier la réussite du sujet et de mettre en évidence les dispersions par rapport à la tâche à réaliser (angle au volant réalisé VS angle au volant demandé). Les observations vidéos permettent de vérifier que le conducteur utilise une gestuelle de tourner le volant naturelle, ne comportant pas de mouvements aberrant ou non ergonomique.

- Score de performance

Les moyennes des scores de performance sont calculées pour les 2 répétitions et les 2 scénarii (soit S1-1, S1\_2, S2\_1 et S2\_2). Les résultats montrent que les moyennes des scores de performance obtenues pour chaque scénario (S1 et S2) par chaque groupe de sujets sont supérieures à 94% (Tableau 11).

**Tableau 11 : Moyenne et écart-type des scores de performance**

Scénario Sujets (Age moy – ET)	% de score de performance Moy (écart-type)			
	S1-S2 i=1	S1-S2 i=2	S2-S1 i=1	S2-S1 i=2
Contrôles (27 – 3,2)	97,4 (2,14)	97,8 (2,07)	97,6 (1,61)	98,5 (1,5)
Agés (72 – 7,6)	94,8 (1,68)	96,1 (2,28)	96,4 (1,97)	97,4 (2,31)
Pathologiques (26 – 5,8)	97,2 (2,09)	98,6 (1,28)	98,5 (1,77)	98,9 (1,07)

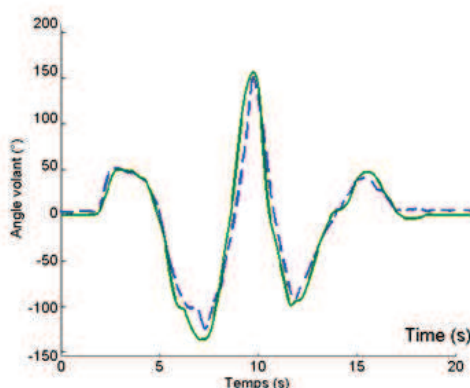
Les scores de performance obtenus par les personnes âgées par rapport aux 2 autres groupes sont différents significativement pour la première répétition de l'enchaînement des scénarii S1-S2 et S2-S1. Pour la deuxième répétition de l'enchaînement des scénarii S1-S2 la différence n'est pas significative, mais la tendance de l'échantillon montre des scores plus faibles pour le groupe personne âgée. Par contre, il ne semble pas y avoir de différences entre les groupes pour la deuxième répétition de l'enchaînement des scénarii S2-S1 ( $p \gg .05$ , Tableau 12).

Les résultats montrent aussi que les scores de performance moyens augmentent au fur et à mesure des répétitions. De plus aucun sujet n'a signalé de nausées ou de gênes particulières.

**Tableau 12 : Résultats statistiques des comparaisons des scores de performance entre les groupes sain, âgé et avec pathologie**

Scénario	Comparaison des scores entre les groupes			
	S1-S2 i=1	S1-S2 i=2	S2-S1 i=1	S2-S1 i=2
Significativité du test	H (2, N=24)=7,52 p=0,023	H (2, N=24)=5,21 p=0,073	H (2, N=24)=6,13 p=0,046	H (2, N=24)=2,05 p=0,358

Les courbes de l'angle au volant mesurées sont représentatives de la consigne demandée (Fig. 17). En exemple, la Fig. 55 illustre ce propos en présentant la courbe de l'angle au volant réalisé par un conducteur pathologique et la consigne. L'angle au volant réalisé suit « correctement » l'angle au volant demandé. La zone de tolérance (§ 2.1.3) permise par le scénario ne met pas le sujet en crise de temps face à la tâche et lui permet d'effectuer des gestes assez « fluides ». Le tableau présenté en annexe 3 donne les écarts moyens et les écarts moyens absolus à la consigne projeté ainsi que les écarts types et scores de performance associés.



**Fig. 55: Représentation de l'angle au volant pour le virage n°10: en pointillé l'angle demandé, en vert, l'angle réalisé. Score de performance total du scénario : 95,6%**

- Observations vidéo

L'analyse vidéo permet de mettre en évidence différentes stratégies de tourner le volant entre les sujets. La Fig. 56 montre 2 conducteurs sains pour le même angle d'un même virage à droite. Le conducteur de gauche croise les mains (la main droite et au-dessus de la main gauche) pour tourner le volant alors que le conducteur de droite ne les croise pas. Les scores de performance obtenus par ces 2 conducteurs sont identiques (96% pour chacun des conducteurs).



Fig. 56 : Stratégies de conduites différentes pour un même virage (virage 6 : 400° à droite).

Pour une même consigne, des stratégies différentes (conduite à une main, mains qui se croisent pour tourner le volant, etc...) peuvent être observées. L'interface visuelle produit donc différentes stratégies de positions de mains sur le volant pour une même consigne.

### 2.2.3. Validation du V3B

Le volant instrumenté V3B présente des différences avec le volant d'origine (Cf. Fig 41, § 2.1.2). Elles concernent à la fois ses caractéristiques mécaniques et son design. L'objectif est de montrer que le volant V3B n'induit pas de biais dans la conduite. Pour cela, des données objectives (observation vidéo, couple résultant et position angulaire du volant) et subjectives (questionnaire) sont recueillies. Les données recueillies sur les deux volants sont comparées avec via une Anova à mesures répétées.

- Observations vidéo

Pour valider le volant V3B, des grilles d'observation sont construites (exemple Tableau 13). Elles permettent de répertorier la position des mains, observée à partir des vidéos numériques enregistrées, à travers différents items :

1/ Position des mains : les mains du sujet sont marquées de scotch de couleur afin de distinguer la main droite de la gauche. Le volant est virtuellement découpé en 4 zones : Vert (V), Rouge (R), Jaune (J) et Bleue (B) (Fig. 57). Les 4 zones sont considérées fixes par rapport au repère du laboratoire. L'instant d'apparition d'une nouvelle position de main est également reporté sur la grille.

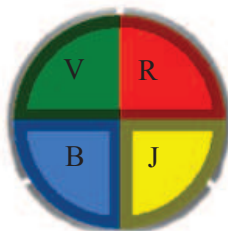



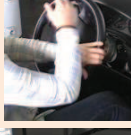

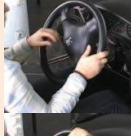


Fig. 57 : Découpage du volant en 4 zones

2/ Type de comportement face à la tâche. Deux types : un comportement de type 1 (T1) qui traduit un état de « qui dure dans le temps » et un comportement de type 2 (T2) qui marque un « événement », c'est-à-dire un moment où le conducteur bouge les mains. Ces deux types de comportement sont observés pour chaque virage proposé. Ceci permet de situer le mouvement selon une échelle temporelle et de retrouver des comportements typiques en fonction des virages proposés.



**Tableau 13: Extrait de grille d'observation, à gauche et images vidéo correspondantes à droite**

N° Scénario	Comportement					Images vidéo
	Instant d'apparition du comportement	Durée de l'évènement	Position main gauche	Position main droite	Type de comportement	Action correspondante
1	27.3	0.8	V	J	1	
	28.1	1.2		J	2	
	29.3	0.7	V	J	1	
	30	0.6	V		2	
	30.6	1.6	V	B	1	
	32.2	0.4		B	2	
	32.6	3.8		J	B	1

Pour savoir si les volants sont significativement différents, une Anova à mesures répétées est effectuée sur le nombre de fois où une zone est touchée et le temps moyen cumulé pour un type. Les résultats montrent qu'il n'y a pas de différences entre les volants. Les résultats de l'Anova sont présentés en annexe 4.

- Efforts au volant

Le dynamomètre central placé sur la colonne de direction mesure les 3 forces et les 3 moments exercés au centre du volant. Le repère associé au dynamomètre est présenté à la Fig. 58, avec X sur l'axe horizontal dirigé vers la droite, Y l'axe vertical vers le haut et Z l'axe suivant la rotation du volant.

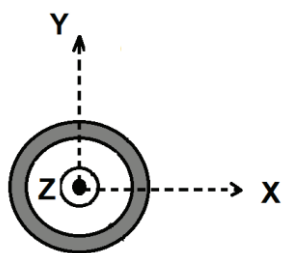


Fig. 58 : Repère du dynamomètre central

Sont définis :

- $C_i$  : le moment de rotation selon l'axe Z mesuré à l'instant i par le dynamomètre disposé sur la colonne de direction
- le moment de rotation moyen  $C_{moy}$  :  $C_{moy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i$  avec n le nombre de mesures
- le moment de rotation moyen absolu  $C_{moy,abs}$  :  $C_{moy,abs} = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i \right|$

La position angulaire du volant est, quant à elle, directement donnée par la 1/2 Steer-by-Wire. Le calcul est fait directement par le calculateur interne, à partir de la position angulaire du moteur et du nombre de 1/2 tour du réducteur<sup>13</sup>.

Les résultats montrent que le moment de rotation moyen ( $C_{moy}$ ) et le moment de rotation moyen absolu ( $C_{moyAbs}$ ) ne sont pas significativement différents pour les 2 volants et pour l'ensemble des scénarios testés : respectivement  $F(2,41) = 0,21$   $p=0,8$   $\eta^2 = 0,01$  pour le moment moyen respectivement  $F(2,41) = 1,05$   $p=0,35$   $\eta^2 = 0,04$  pour le moment moyen absolu. Les masses des volants et leurs moments d'inertie ne semblent donc pas induire de différence entre les deux volants.

- Les questionnaires

Pour l'ensemble des items du questionnaire (§ 2.2.1), il n'y a pas d'effet de l'ordre de passation des volants. Il n'y a également pas d'effet du volant, ni du groupe sur la plupart des items du questionnaire. Les items qui ont un effet significatif sont les items d'élégance du volant (confort) et du toucher (perceptif) (Tableau 14). Les sujets considèrent le V3B comme étant plus élégant et plus agréable au toucher.

<sup>13</sup> Dans la steer-by wire, c'est un engrenage qui réduit l'angle de braquage pour une rotation donnée.

**Tableau 14 : Résultats de l'Anova pour les 2 items qui induisent des différences entre les volants**

Elégance du volant (pas du tout/tout à fait)			Toucher (agréable/désagréable)		
Volant VO	Volant V3B	Comparaisons	Volant VO	Volant V3B	Comparaisons
3.77	5.11	F (1, 21) = 4.69 ; <b>p&lt;.05</b>	5.70	6.89	F (1, 21) = 5.70 ; <b>p&lt;.03</b>

Ces différences viennent d'un jugement esthétique subjectif du conducteur et n'ont pas d'impact sur l'exécution du geste de tourner le volant. Les autres items testés (le confort général du volant, les aspects perceptifs et moteurs) pour les 2 volants ne montrent pas de différences significatives.

#### **2.2.4. Conclusion**

Ces premières expérimentations ont validé l'utilisation de l'interface visuelle et du volant V3B.

L'interface visuelle est adaptée à un public de conducteurs hétérogènes puisque tous les conducteurs ont réussi la tâche avec en moyenne un score de performance supérieur à 94%. De plus, l'hypothèse de départ est validée puisqu'elle met en évidence plusieurs stratégies de tourner le volant.

Le volant V3B n'induit pas de différence dans la tâche de tourner le volant par rapport à un volant normal au regard des analyses des vidéos, de l'analyse des données objectives au volant, ainsi que des questionnaires.

De plus, à scores équivalents (donc angles au volant quasi identiques), les observations vidéo mettent en avant des stratégies de tourner le volant différentes pour des personnes d'un même groupe de conducteur. L'interface visuelle et le volant V3B peuvent alors être utilisés dans le protocole expérimental d'analyse du geste de tourner le volant.

### **2.3. Protocole retenu pour l'analyse du geste de tourner le volant**

#### **2.3.1. Population**

Une centaine de sujets mixtes et titulaires du permis B est recrutée pour l'expérience. Cet échantillon est réparti en trois groupes : les sujets sains (33), âgés (24) et en situation de handicap (62), dits aussi pathologiques. Les sujets sont sélectionnés par le LAMIH de Valenciennes, la Fondation Hopale de Berck sur Mer et le CHRU de Lille. Les paragraphes suivants explicitent les critères d'inclusions retenus. La population âgée et pathologique a été recrutée dans le cadre du projet ANR VolHand (cf Chap. 5). Les sujets sains ont été recrutés principalement pour les travaux menés dans cette thèse.

*Critères d'inclusion pour les sujets sains*

- Taille > 150 cm et < 190 cm
- Indice de masse corporelle (IMC) < 30 : pas de personnes obèses

- Vision binoculaire corrigée à 5/10 minimum, aucun œil inférieur à 1/10, champ visuel horizontal de 120°, vertical de 60°.
- Bilan cognitif et comportemental (sénilité, ...) : Utilisation du bilan "Mini Mental State Examination" (Annexe 5). Le seuil d'inclusion est supérieur à 25.
- Pas de traitement médicamenteux engendrant somnolence ou perte de vigilance, anxiolytiques, psychotropes non stabilisés, sédatifs non stabilisés.
- Amplitudes articulaires : seuils fixés dans le Tableau 15 – Chez les sujets sains et âgés, les deux bras doivent satisfaire au minima ces contraintes.

**Tableau 15. Seuil d'inclusion pour le membre supérieur.**

Membres supérieurs, seuils d'inclusion (mesure au goniomètre manuel)	Epaule	Abduction	10°
		Adduction	10°
		Antéro pulsion	60°
		Rétro pulsion	0°
		Rotation externe	10°
		Rotation interne	45°

*Critères d'inclusion pour les sujets âgés :*

- Age : 70 ans et plus
- Bilan moteur : Avoir les deux bras fonctionnels (cf. Tableau 15) et pas d'antécédent de fracture ou d'intervention chirurgicale intéressant les membres supérieurs.
- Expérience de la conduite : titulaire du permis B et conduisant régulièrement (c-à-d : 1 fois par semaine, avec des trajets de 20 km une fois par mois).

Critères d'inclusion pour les sujets pathologiques

*Sclérose en plaques (SEP, 14 sujets) :*

- Bilan articulaire : cf tableau 15
- Continences stabilisées (pas de fuite anal/vésical, poche ou protection acceptée)
- Escarres stabilisées
- Titulaire du permis B, conduisant ou en cours de régularisation de permis

*Tétraplégiques (21 sujets) :*

- Les patients peuvent effectuer eux-mêmes leur transfert du fauteuil roulant vers le siège auto. Sont exclus les tétraplégiques qui n'ont pas d'équilibre du tronc ni de rotation cervicale et des contractures.

- Continences stabilisées (pas de fuite anal/vésical, poche ou protection acceptée).
- Escarres stabilisées.
- Titulaire du permis B, conduisant ou en cours de régularisation de permis.

*Polyarthrite rhumatoïde (12 sujets) :*

- Bilan moteur : Les éléments suivants sont à évaluer : perte de force de préhension, limitation douloureuse des épaules (EVA).
- Titulaire du permis B, conduisant ou en cours de régularisation de permis.

*Myopathes (15 sujets) :*

- Pathologies : dystrophie musculaire des ceintures<sup>14</sup>, dystrophies facio-scapulo-humérales<sup>15</sup>, dystrophie musculaire de Becker<sup>16</sup>.
- Bilan moteur : Les éléments suivants sont à évaluer : perte de force musculaire des épaules et de la préhension, amplitude articulaire active des membres supérieurs.
- Titulaire du permis B, conduisant ou en cours de régularisation de permis

La campagne de mesure a débuté en décembre 2010 et s'est achevée en novembre 2011. Compte tenu de la complexité de la gestuelle et des contraintes induites par l'encombrement de la maquette, certaines acquisitions comportent des pertes de marqueurs (consécutives) trop importantes les rendant inexploitable. La campagne d'expérimentation (derniers sujets passés en novembre 2011) ainsi que le temps de dépouillement d'un fichier (de 3 à 5h par sujet) rendent le traitement des fichiers Vicon® complexe et chronophage. En conséquence, les mesures de certains sujets n'ont pas encore été dépouillés et d'autres sont inexploitable. Le bilan des sujets dont la cinématique est exploitable fait état de 23 sujets sains, de 15 sujets âgés et de 44 sujets pathologiques (Fig. 59). Sur ces 23 sujets, l'enregistrement des valeurs d'angle et d'efforts au volant n'a pas fonctionné pour 3 sujets : les analyses des variables dynamiques portent donc sur 20 sujets. Le tableau 16 résume les caractéristiques générales de la population exploitable.

---

<sup>14</sup> Maladies neuromusculaires qui affectent essentiellement les muscles volontaires situés autour des épaules et de la région pelvienne (les hanches)

<sup>15</sup> C'est une atteinte musculaire débutant généralement par la face, progressant à la ceinture scapulaire ensuite aux bras, puis évoluant en touchant les muscles abdominaux, les membres inférieurs et pouvant affecter toute la musculature

<sup>16</sup> Faiblesse musculaire prédominant aux membres inférieurs (fatigue à la marche, gêne pour courir, sauter, monter des escaliers) qui apparaît dans l'enfance ou l'adolescence, voire plus tard.

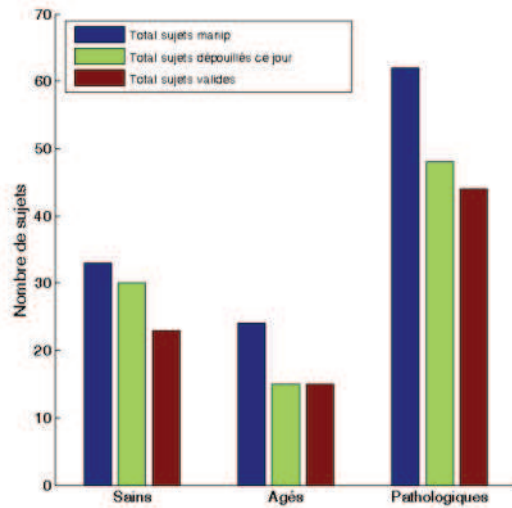


Fig. 59: Bilan du nombre de sujets exploitables

Tableau 16. Caractéristiques générales de la population, moyenne (écart-type).

Sujets sains	Sujets âgés	Sujets pathologiques
18 droitiers et 5 gauchers	14 droitiers et 1 gaucher	40 droitiers et 4 gauchers
Age : 30 ans (10.31)	Age : 75 ans (4.19)	Age : 48 ans (13.75)
Taille : 1.73 m (8.32)	Taille : 1.65 m (0.1)	Taille : 1.70 m (0.1)
Masse : 76.86 kg (16.58)	Masse : 74 kg (12.90)	Masse : 72.76 kg (14.57)

### 2.3.2. Présentation du protocole

Le protocole expérimental se déroule en plusieurs étapes. La Fig. 60 décrit leur chronologie. Ensuite, chaque étape est explicitée.

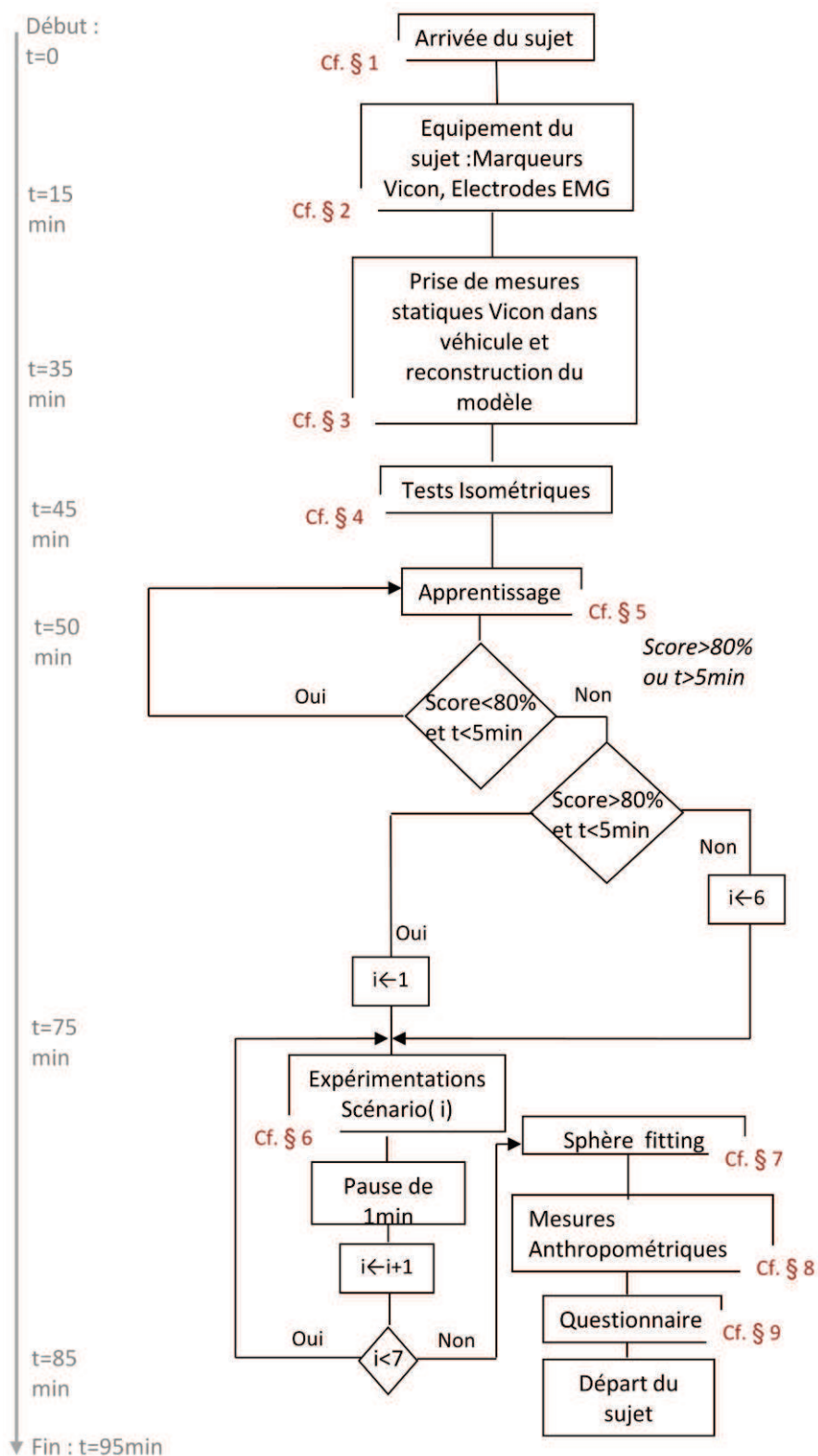


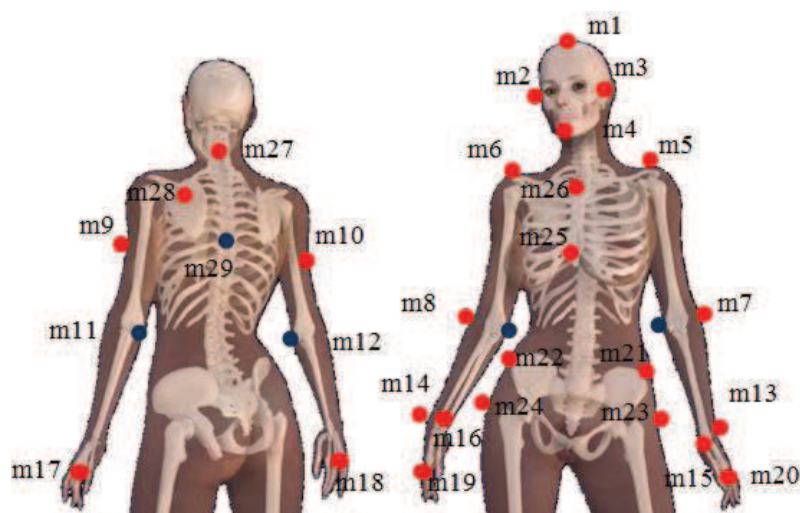
Fig. 60 : Les étapes du protocole expérimental avec i = nb de répétitions

### 1. Arrivée du sujet

Le sujet est accueilli par l'équipe d'un des laboratoires (LAMIH, CHRU, Fondation Hopale). Les objectifs et le déroulement de l'expérimentation lui sont présentés. Celui-ci confirme sa collaboration par la signature d'une fiche de consentement éclairé (voir Annexe 6). Le sujet peut alors se mettre en tenue pour débiter l'expérimentation. La tenue vestimentaire demandée doit être légère et ne pas gêner la pose des marqueurs comme par exemple un caleçon, ou short moulant et un haut de maillot ou une brassière pour les femmes. Les hommes sont de préférence torse nu.

### 2. Equipement du sujet

Le sujet est équipé de 26 marqueurs. Ils sont disposés en des points anatomiques repérables afin de standardiser les essais entre les sujets. A la fin de l'expérimentation, 3 autres marqueurs lui sont ajoutés sur les épicondyles médiaux et T8 (Fig. 61). Ces marqueurs sont utilisés dans la méthode du sphere fitting pour estimer les centres articulaires des épaules, après quelques mouvements du membre supérieur.



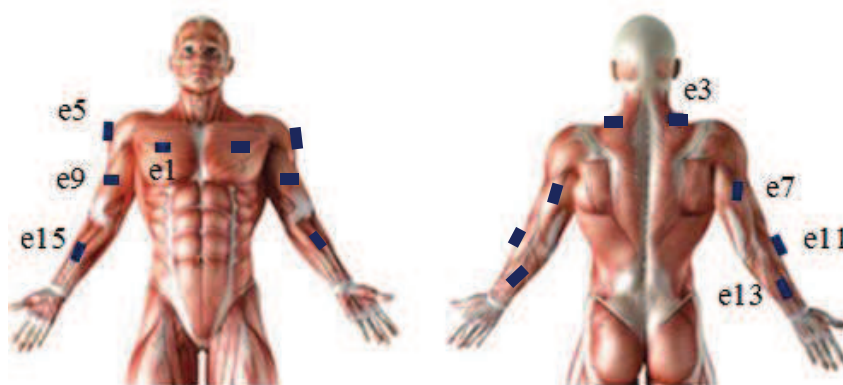
**Fig. 61: Positions des marqueurs sur le sujet, en rouge, les marqueurs positionnés au début de l'expérimentation, en bleu les marqueurs rajoutés pour le sphere fitting**

Marqueurs	Position anatomique	Marqueurs	Position anatomique
m1	Front	m15	Styloïde radial gauche
m2	Oreille droite	m16	Styloïde radial droit
m3	Oreille gauche	m17	Métatarse 5 gauche
m4	Menton	m18	Métatarse 5 droit
m5	Acromion gauche	m19	Métatarse 2 gauche
m6	Acromion droit	m20	Métatarse 2 droit
m7	Epicondyle latéral gauche	m21	Epine iliaque antéro-supérieur G
m8	Epicondyle latéral droit	m22	Epine iliaque antéro-supérieur D
m9	Rotateur bras gauche	m23	Trochanter gauche
m10	Rotateur bras droit	m24	Trochanter droit



m11	Epicondyle médial gauche	m25	Processus xyphoïde
m12	Epicondyle médial droit	m26	Manubrium
m13	Styloïde ulnaire gauche	m27	C7
m14	Styloïde ulnaire droit	m28	Rotateur tronc
		m29	T8

Le sujet est également équipé, à cette étape, d'électrodes EMG. Ils ont pour objet de mesurer, pour chaque membre supérieur, l'activité électrique de 8 muscles (5 sur le bras et 3 sur l'avant-bras) considérés comme essentiels pour le mouvement de tourner du volant (Fig. 62) (Pick 2006) (Chap 1, §3.2. La Fig. 63 montre un sujet sain équipé des marqueurs et des électrodes EMG.



**Fig. 62: Emplacement des électrodes EMG pour le membre supérieur droit.**

EMG	Muscles	Actions
e1	Portion du grand pectoral	Antépulsion, adduction du bras
e3	Trapèze	Abaisseur de l'épaule, extension, adduction et rotation interne
e5	Deltoïde	Abduction, fléchisseur du bras
e7	Triceps brachial	Extension du bras et du coude
e9	Biceps brachial	Flexion du bras, de l'avant-bras et supination de l'avant-bras
e11	Long supinateur	Flexion du bras et de l'avant-bras. Pronation de l'avant-bras
e13	Fléchisseur des doigts	Flexion des articulations inter-phalangiennes distales des 4 doigts longs
e15	Extenseurs commun des doigts	Extension des articulations inter-phalangiennes distales des 4 doigts longs



**Fig. 63: Sujet équipé des marqueurs Vicon et des électrodes EMG.**

### 3. Prise de mesures statiques

Deux prises de mesures statiques sont effectuées avec Vicon® :

- Maquette et volant seul.
- Sujet équipé, assis en position de conduite (assis dans le véhicule, main sur le volant à 10h et 2h), avec tous les marqueurs visibles (Fig. 64)

Cette étape permet de dimensionner le modèle générique créé pour cette expérimentation Vicon® (.vst) à l'anthropométrie du sujet, en créant le modèle personnalisé (.vsk). Ce modèle personnalisé permet la labellisation automatique du sujet (nomination de chacun des marqueurs) lors des expérimentations.



**Fig. 64: Prise de mesure statique du sujet**

### 4. Tests isométriques

Des tests isométriques sont réalisés après les mesures statiques. Il est demandé au sujet, à cette étape, de faire des tests d'efforts maximum volant bloqué (blocage mécanique), à une et à deux mains, dans 6

positions (Fig. 65). L'intérêt de ce test est de quantifier les efforts (forces et moments) maximums développés par chaque membre supérieur sur le volant, pour une position cible. Ce test s'effectue dans les 2 sens (5s dans le sens horaire et 5s dans le sens anti-horaire) pour une position donnée avec 10s de repos, entre chaque position. Le test commence main droite en position 1. Une fois toutes les positions testées main droite, le sujet recommence l'opération main gauche, en partant également de la position 1. Enfin, le test se termine par une prise de mesure à 2 mains, en position 1 et 4, 2 et 5 et 3 et 6.



**Fig. 65: Positions des mains lors des tests isométriques**

Pour aider le sujet dans cet exercice, une interface visuelle dédiée est conçue. Un point rouge signale au sujet l'endroit sur le volant où sa main doit être placée et une flèche noire apparaît pour indiquer le sens de l'effort à appliquer (Fig. 66). Le sens de la flèche s'inverse toutes les 5 s et le point change de position automatiquement après chaque série d'effort horaire/anti-horaire.



**Fig. 66: Interface visuelle des tests isométriques. En rouge la position où la main doit être positionnée, la flèche noire indiquant le sens d'application de la force sur le volant**

### 5. Apprentissage

Comme pour l'étude préliminaire (§ 2.2.1), une phase d'apprentissage est proposée au sujet pour se familiariser avec la tâche. Les sujets qui n'atteignent pas un score de 80% de réussite au test d'apprentissage (seuil identique aux études préliminaires), en moins de 5 minutes, ne sont pas retenus pour l'analyse des résultats. Dans ce cas, un seul scénario de conduite leur est proposé lors des expérimentations.

## 6. Expérimentation

L'expérimentation se déroule en deux temps : dans un premier temps, un exercice de créneau (Fig. 48 §2.2.1) est proposé puis dans un second temps, un exercice de suivi de trajectoire. Les représentations graphiques utilisées par le didacticiel d'apprentissage sont reprises : les créneaux sont représentés par des cibles et les virages par des exercices de suivi de trajectoire. La durée de conduite testée (12min) lors des premières expérimentations est conservée car il n'y a ni de démotivation (puisque les scores augmentent) ni de nausées ou gênes particulières chez les sujets, et ceci malgré une certaine monotonie de la tâche (cf. § 2.2.2). Dans ce nouveau protocole, 6 répétitions de scénario de 7 virages (parmi les 10 précédemment sélectionnés) sont utilisés : virages n°2, 3, 4, 6, 7, 8 et 10 Le même code couleur est repris. Entre chaque scénario, un temps de pause de 1 min est prévu, si le sujet en ressent le besoin.

## 7. Sphère fitting

Bras droit tendu, puis bras gauche tendu, les conducteurs effectuent 5 flexions/extensions, 5 abductions/adductions et 5 rotations du bras. A l'exception des personnes en fauteuil roulant, les sujets réalisent cette étape du protocole, debout, en dehors de la maquette. Pour les personnes sévèrement handicapées, ce test s'effectue sur un tabouret ou, le cas échéant, sur leur propre fauteuil roulant. Les centres articulaires des épaules sont estimés par la méthode de « sphere fitting » de (Gamage and Lasenby 2002). Cette méthode consiste à calculer le barycentre des sphères concentriques décrites par les marqueurs apposés sur le segment distal (ici le membre supérieur) ayant leurs coordonnées exprimées dans le repère local immédiatement proximal (ici le repère lié à la clavicule).

## 8. Mesures anthropométriques

Avant de déséquiper le sujet des mesures anthropométriques des membres supérieurs et du tronc sont prises (Annexe 7). Ces données sont utilisées pour calculer la position des centres de masse de chaque segment.

## 9. Questionnaires

Une fois déséquipé, le sujet remplit le questionnaire présenté à l'annexe 8. Ce questionnaire vise à avoir des informations relatives au sujet (âge, sexe, etc...) et à ses habitudes de conduite (nombre de km parcourus/an, nb de voitures conduites, etc...) et également d'évaluer le niveau de douleur, de gênes et de fatigue induit par la tâche. Les consignes associées au questionnaire sont données par écrit afin de standardiser les informations transmises. Le temps de réponse imparti est illimité. Le sujet remplit le questionnaire seul.

## **3. Traitement des données expérimentales**

Cette partie décrit le processus de traitement des données expérimentales. Dans ce travail de thèse, seules les données cinématiques et dynamiques du geste de tourner le volant chez le sujet sain sont ciblées. Nous renvoyons le lecteur au chapitre 5 qui propose quelques perspectives exploitant les questionnaires et des mesures EMG. Il est présenté séquentiellement dans ce chapitre, la labellisation des marqueurs Vicon® sous Nexus, le calcul des centres articulaires, le calcul des angles articulaires et l'estimation du centre de masse. Le traitement des données dynamiques est renvoyé au chapitre 4.

### 3.1. Labellisation des marqueurs Vicon® sous Nexus

La labellisation est une étape post expérimentation qui consiste à identifier les marqueurs disposés sur le sujet, la maquette et le volant, pour chaque essai. Les coordonnées des marqueurs identifiées sont exprimées dans le repère Vicon, défini lors de la calibration des caméras. La Fig. 67 présente un essai Vicon après labellisation.

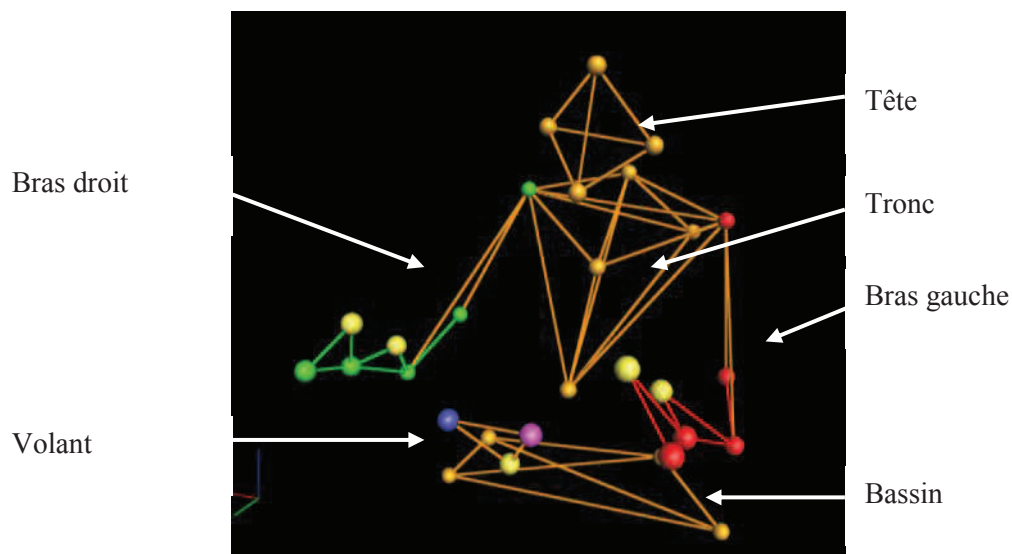


Fig. 67: Dépouillement Vicon d'un sujet.

L'encombrement de la maquette ainsi que la complexité du geste induisent des dépouillements longs et difficiles. Les reflets dus à l'habitacle et les occultations de marqueurs lorsque les sujets croisent les mains sont fréquents. De ce fait, la labellisation automatique prévue sous Nexus n'est pas complètement efficace : il est nécessaire de combler les « trous » restant grâce à la fonction « fil gap » de Nexus. Cette fonction consiste à copier la trajectoire d'un marqueur présent pour reboucher le trou du marqueur qui disparaît. Ceci est possible si la trajectoire du marqueur qui disparaît est identique à la trajectoire du marqueur copié. Par exemple, la trajectoire du marqueur m21 (l'épicondyle latéral du coude gauche) peut être copiée pour reboucher les trous du marqueur m13 (styloïde ulnaire gauche) puisqu'ils sont anatomiquement liés. Le temps de dépouillement par sujet peut varier de 2 à 5h pour la totalité de l'expérimentation pour un sujet (les tests isométriques + les 6 scénarii + sphere fitting droit et gauche).

Pour faciliter le transfert des fichiers, les données acquises à 100 Hz sont filtrées (filtre de type Chebyshev 8<sup>ème</sup> ordre puis sous-échantillonnées à 25 Hz<sup>17</sup>).

### 3.2. Création de repères locaux

Les repères locaux sont nécessaires à l'analyse cinématique (position des mains, angles articulaires) et dynamique (efforts au volant, efforts interarticulaire) du geste. Ils sont définis à partir des coordonnées 3D des marqueurs sur le volant pour le repère local du volant et des membres supérieurs pour les repères articulaires. Dans une première partie, le calcul du repère local du volant est précisé et dans

<sup>17</sup> Fonction decimate de Matlab®

une deuxième partie, les repères locaux des articulations de l'épaule, du coude et du poignet sont présentés.

### 3.2.1. Repère local du volant

Le repère volant de la maquette aurait pu être défini à partir des coordonnées des 3 marqueurs sur le plan du volant. Cependant, le « capot bombé » du volant induit trois trajectoires non coplanaires (Fig. 68):



Fig. 68: Trajectoires des 3 marqueurs du volant

Le calcul du repère volant ne peut donc se résumer à calculer un repère simplement à partir de produits vectoriels : le vecteur résultant du produit vectoriel de ces 3 marqueurs ne serait pas perpendiculaire au plan du volant. L'orientation du repère serait alors mal définie et dépendante de l'angle volant.

Le repère au volant est alors défini par le cercle décrit par chacun des marqueurs dans plan orthogonal à l'axe de rotation du volant. L'approche consiste donc à calculer le cercle au moindre carré décrivant le nuage de point des 3 marqueurs. Ce calcul est composé de trois étapes :

- calcul du plan aux moindres carrés décrivant le nuage de points : le barycentre et le vecteur normal au plan de chacun des cercles sont obtenus,
- projection des points sur ce plan : les cercles sont regroupés sur un unique plan,
- enfin, calcul du cercle aux moindres carrés : pour obtenir le centre des 3 cercles décrivant la trajectoire des points et leur rayon.

La normale au plan formé par les 3 cercles et le centre de rotation de chacun des marqueurs du volant sont utilisés pour la construction du repère volant. Le repère volant est défini par (Fig. 69) :

- le centre du repère  $O_{vol}$  est le barycentre des trois centres de rotations,
- le vecteur  $k_{vol}$  est le vecteur moyen des trois normales des trois cercles,
- le vecteur  $i_{vol}$  est le produit vectoriel de  $k_{vol}$  et du vecteur  $[0\ 0\ -100]$ , vecteur vertical, dirigé vers le bas, de longueur 100mm,  $i_{vol}$  est dirigé vers la droite du conducteur,
- le vecteur  $j_{vol}$  est le produit vectoriel de  $k_{vol}$  avec  $i_{vol}$ , dirigé vers le haut.

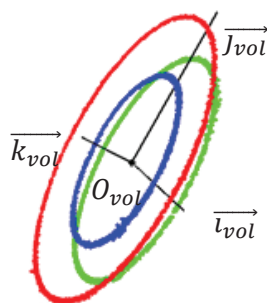


Fig. 69: Repère volant à partir de la trajectoire des marqueurs sur le volant

Le repère ainsi construit (Fig. 70) ne se déforme pas selon la rotation du volant et ne nécessite aucun placement particulier des 3 marqueurs du volant.

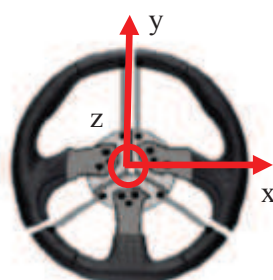
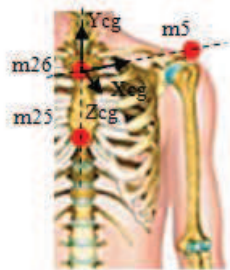


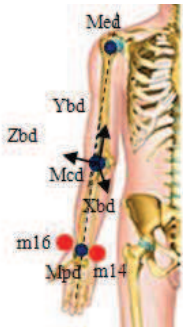
Fig. 70 : Représentation du repère au volant  $R_v$

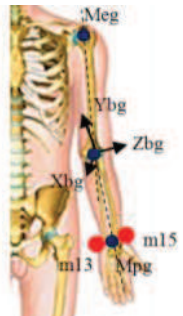
### 3.2.2. Repères locaux des membres supérieurs et du tronc du conducteur

Chaque repère est orthonormé direct quelque soit le segment. Pour chaque repère segmentaire, l'axe «  $Y_s$  » représente l'axe longitudinal du segment «  $S$  ». Les repères locaux liés aux bras, aux avant-bras et aux mains suivent les recommandations de l'« International Society of Biomechanics » (Wu, van der Helm et al. 2005). Les repères locaux liés aux clavicules sont adaptés des recommandations de l'« International Shoulder Group » (Van der Helm and Pronk 1995). Les repères utilisés sont construits comme suit pour chacun des segments considérés. Les segments ne suivant pas scrupuleusement les recommandations sus-citées sont accompagnés d'un astérisque (\*).

Clavicule droite (*)	Description	Représentation
Oed (origine)	m26	
Zcd	Point d'origine : m26 Point d'extrémité : m6	
Yt	Point d'origine : m25 Point d'extrémité : m26	
Xcd	$Zcd \wedge Yt$	
Ycd	$Xcd \wedge Zcd$	

Clavicule gauche (*)	Description	Représentation
Oeg (origine)	m26	
Zcg	Point d'origine : m26 Point d'extrémité : m5	
Yt	Point d'origine : m25 Point d'extrémité : m26	
Xcg	Zcg $\wedge$ Yt	
Ycg	Xcg $\wedge$ Zcg	

Bras droit	Description	Représentation
Obd (origine)	Mcd	
Ybd	Point d'origine : Mcd Point d'extrémité : Med	
Ad	Point d'origine : Mcd Point d'extrémité : Mpd	
Zbd	Ybd $\wedge$ Ad	
Xbd	Zbd $\wedge$ Ybd	

Bras gauche	Description	Représentation
Obg (origine)	Mcg	
Ybg	Point d'origine : Mcg Point d'extrémité : Meg	
Ag	Point d'origine : Mcg Point d'extrémité : Mpg	
Zbg	Ybg $\wedge$ Ag	
Xbg	Zbg $\wedge$ Ybg	



Av-bras droit	Description	Représentation
Oad (origine)	m14	
Yad	Point d'origine : m14	
	Point d'extrémité : Mcd	
Pd	Point d'origine : m14	
	Point d'extrémité : m16	
Xad	$Pd \wedge Yad$	
Zad	$Xad \wedge Yad$	

Av-bras gauche	Description	Représentation
Oag (origine)	m13	
Yag	Point d'origine : m13	
	Point d'extrémité : m7	
Pg	Point d'origine : m13	
	Point d'extrémité : m15	
Xag	$Pg \wedge Yag$	
Zag	$Xag \wedge Yag$	

Main droite	Description	Représentation
Omd (origine)	m14	
Ymd	Point d'origine : Mmd	
	Point d'extrémité : Mpd	
Zmd	Point d'origine : m16	
	Point d'extrémité : m14	
Xmd	$Zmd \wedge Ymd$	

Main gauche	Description	Représentation
Omg (origine)	m13	
Ymg	Point d'origine : Mmg	
	Point d'extrémité : Mpg	
Zmg	Point d'origine : m15	
	Point d'extrémité : m13	
Xmg	$Zmg \wedge Ymg$	

Les origines ainsi que l'axe longitudinal du tronc pour les repères des clavicules sont différents des recommandations de l'ISB. En effet, la pose des marqueurs a été adaptée aux exigences de l'étude : le dossier du siège conducteur du véhicule ne permet pas la capture de T8 pendant la conduite et entraîne de nombreuses pertes du marqueur en C7, surtout chez les personnes de petite taille. Ces deux marqueurs sont utilisés par l'ISB pour construire l'axe longitudinal du tronc (axe reliant les milieux de C7-manubrium et T8-processus xiphoïde). Ici, les marqueurs manubrium et processus xiphoïde caractérisent cet axe.

Le calcul des centres articulaires du coude et du poignet est fait selon les recommandations relevées dans la littérature (cf. Chap. 1, §3.2.1). Néanmoins, malgré l'attention portée aux expérimentations et les 10 caméras utilisées, la diversité des stratégies motrices mises en place par les sujets et les contraintes environnementales liées au simulateur automobile retenu, la mesure à chaque instant du marqueur médial de l'épicondyle (EM) de l'humérus nécessaire au calcul du centre articulaire du coude (Mcd ou Mcg) est difficile. L'épicondyle médial du coude est alors reconstruit grâce à un repère temporaire, lié au bras, de centre l'épicondyle latéral (EL) (Schiro, Gabrielli et al. 2011) (annexe 9)

Pour le calcul du centre articulaire de l'épaule, le formalisme des matrices homogènes, recommandé par Bråt, Stejskal et al. (1979), est choisi car il est bien adapté pour décrire la cinématique articulaire. Les matrices homogènes permettent de décrire à la fois la translation et la rotation des segments. Elles sont également facilement interprétables : les dimensions des segments se trouvent dans la partie linéaire et la cinématique articulaire dans la partie rotation des matrices homogènes. Comme introduit au chapitre 1 §3.2.1, le centre articulaire de l'épaule est assimilé à l'articulation gléno-humérale. Dans la présente thèse, ce centre est estimé par sphere fitting, recommandé par Wang (1999) pour les mouvements 3D du membre supérieur. Ce calcul se déroule en deux étapes :

- Première étape

Cette étape consiste à rechercher par optimisation les coordonnées du centre de rotation de l'épaule notées  $Me_C$  et considérées constantes dans le repère local lié à la clavicule. Pour cela, les mouvements de circumduction de l'épaule acquis lors des expérimentations (§2.3.2) sont utilisés.

- Deuxième étape

Cette étape consiste à exprimer la position du centre articulaire de l'épaule lors de l'exercice de conduite, à chaque pas de temps dans le repère Vicon. La position du centre articulaire est exprimée comme suit :

$$Me_{vic}(t) = {}^{vic}P(t) \times Me_C$$

Où  $Me_{vic}(t)$  est la position spatiale du centre articulaire de l'épaule à chaque pas de temps (donnée recherchée),  ${}^{vic}P(t)$  est la matrice de passage entre le repère clavicule et le repère Vicon à chaque pas de temps (donnée connue, car mesurée) et  $Me_C$  sont les coordonnées tridimensionnelles de l'épaule dans le repère lié à la clavicule (donnée fixe déterminée à la première étape).

#### 4. Conclusion

Ce chapitre présente le protocole mis en place pour acquérir les données cinématiques des membres supérieurs et les efforts appliqués sur le volant chez le conducteur automobile sans et avec déficiences du membre supérieur pendant une situation de manœuvres à basse vitesse. Pour cela, la plateforme expérimentale se compose :

- d'un simulateur de conduite compact,
- d'un volant 3 branches instrumenté de dynamomètres,
- d'une interface visuelle simulant des manœuvres à basse vitesse,
- d'un système de caméras Vicon MX,
- d'un système EMG Zerowire Aurion.

Une étude préliminaire a validé l'interface visuelle et le volant V3B utilisés. Un score de performance défini montre que la consigne proposée au travers l'interface visuelle en 2D est réalisable par une population hétérogène (sujets sains, âgés et pathologiques) et permet des stratégies de position de mains différentes pour 2 sujets dans un même virage. L'étude préliminaire a également montré que le volant 3 branches instrumentées n'induit pas de biais dans la pose des mains pour tourner le volant, par rapport au volant d'origine. Cette étude met également en avant l'apparition de stratégies différentes dans la pose des mains au cours d'une tâche de tourner le volant. A l'issue des expérimentations, l'ensemble des données nécessaires à l'analyse biomécanique multi variables du geste de tourner le volant est disponible. Les données sont labellisées à partir de l'interface Vicon Nexus ®. Les repères articulaires et les repères au volant sont créés pour obtenir les coordonnées des données labélisées dans les repères associés.

L'étude de l'interaction cinématique main volant et les résultats obtenus sont présentés au chapitre suivant. Le chapitre 4 introduit les résultats de l'analyse cinématique et dynamique des membres supérieurs dans la tâche de tourner le volant.

**Annexe 1 : Décharge sujet pour l'étude du volant instrument » V3B**

**Décharge sujet**

Madame/Monsieur X

Vous avez accepté de participer à ce protocole et nous vous en remercions.

Ce test se déroule le XX/XX/XXXX, de .....h..... à .....h..... dans les locaux .....

Ce test est réalisé avec votre entier consentement et vous déclarez :

Avoir été pleinement informé de la nature du test, de son objectif, de sa durée et des attentes vous concernant. Vous avez été averti des éventuels désagréments et risques qui pourraient en résulter

Avoir eu la possibilité de poser des questions sur tous les aspects du protocole et avoir compris les réponses qui vous ont été transmises.

Accepter de suivre toutes les instructions qui vous seront données pendant le test et de remettre les questionnaires fournis à la fin du test.

Accepter que les données enregistrées à l'occasion de ce test puissent faire l'objet d'un traitement informatisé. Vous êtes informé qu'en application de la loi modifiée « Informatique et Liberté » du 6 janvier 1978, vous pourrez demander l'accès aux données vous concernant et la rectification de celles-ci. Vous acceptez de ne pas restreindre l'utilisation des résultats du test et en particulier, vous acceptez que ces résultats puissent être divulgués dans le monde entier, sachant que votre identité ne sera pas dévoilée.

Ne prétendre aucun dédommagement de quelque nature qu'il soit pour la réalisation de ce test.

Etre informé de votre possibilité de vous retirer du test à tout moment, sans condition.

Céder au LAMIH, à titre gratuit, sur tout support et dans le monde entier, les droits d'exploitation sur votre image, issue d'une photographie ou d'une vidéo effectuée lors du test.

Céder au LAMIH, à titre gratuit, pour une durée de 5 ans, l'intégralité des droits d'auteurs (droit de reproduction et de représentation) relatifs aux commentaires ou articles sur le protocole en cours.

Garantir la confidentialité des informations qui seront portées à votre connaissance. Cette clause restera en vigueur tant que les informations ne seront pas tombées dans le domaine public.

Fait à Valenciennes, le

Signature

Précédée de la mention « lu et approuvé – bon pour accord »

**Annexe 2** : Questionnaire utilisé pour l'étude du volant instrumenté V3B

Ce questionnaire est découpé en 2 parties : une partie sur les informations générales du sujet et une deuxième partie (Q1 et Q2) sur les informations sur le volant. Pour standardiser la consigne, un exemple est donné au sujet.

**1/ « Informations générales »**

✓ Vous êtes :  une femme  un homme  
 droitier  gaucher

✓ Taille (m) :                      Poids (Kg) :                      Age :    ans

✓ En quelle année avez-vous obtenus le permis B :

✓ Possédez-vous d'autres permis de conduire ?  A  C  D  E(B)  E(C)  E(D)

✓ Indiquez votre kilométrage habituel en tant que conducteur de voiture. Selon la formule que vous trouvez la plus simple pour vous, rapportez ce kilométrage à la durée de votre choix (par an, par mois, ou par semaine).

Km, par

✓ Principalement (plusieurs réponses possibles) :

Sur autoroute

Sur route

En ville

Autre

✓ Avec quelle fréquence utilisez-vous votre voiture :

Tous les jours, ou presque

2/3 fois par semaine

Une fois par semaine

Moins d'une fois par semaine

✓ Quelle est votre voiture actuelle (marque et type) ?

✓ De quel type de transmission est équipée votre voiture actuelle ?

Boite manuelle à                      rapports

Boite automatique

Boite séquentielle

✓ Quelles voitures avez-vous conduites dans le passé ?

## 2/ Informations sur le volant

Consigne : nous vous proposons d'utiliser une sorte de règle qui permet de mesurer vos impressions liées à l'utilisation du volant au cours du trajet que vous venez de réaliser.

L'intensité de votre ressenti ou votre degré d'approbation peut être défini par un trait vertical tracé sur l'échelle comme dans l'exemple ci-dessous :

Exemple- Aimez-vous le chocolat ? Marquez l'échelle pour indiquer dans quelle mesure vous aimez le chocolat.



Une extrémité du trait horizontal correspond à la situation où vous adorez le chocolat. Plus le trait que vous allez tracer est proche de cette extrémité, plus vous aimez le chocolat. L'autre extrémité correspond à la situation où vous détestez le chocolat. Plus le trait est proche de cette extrémité, moins vous aimez cet aliment.

Nous vous proposons maintenant de faire quelques essais (non pris en compte) afin de vous habituer aux questions et à l'échelle de réponse qui vous seront proposées dans la suite du questionnaire.

Essai 1 (*pour vous familiariser avec l'échelle*) - Pouvez-vous situer le centre de l'échelle ?

xxx  xxx

Essai 2 (*pour vous familiariser avec l'échelle*) - Pouvez-vous situer les 2/3 de l'échelle ?

xxx  xxx

Essai 3 (*pour vous familiariser avec l'échelle*) - Pouvez-vous situer le 1/3 de l'échelle ?

xxx  xxx

Essai 3 (*pour vous familiariser avec les questions*) - Regardez-vous souvent la télévision ?

Jamais  Souvent

### Questionnaire 1 :

1- Le positionnement des mains sur le volant se fait-il naturellement ?

Pas du tout \_\_\_\_\_ Tout à fait  
naturellement naturellement

2- L'inclinaison du volant est-elle confortable ?

Pas du tout \_\_\_\_\_ Tout à fait  
confortable confortable

3- Votre position de conduite est-elle confortable ?

Pas du tout \_\_\_\_\_ Tout à fait  
confortable confortable

4- En conduisant, le volant est-il glissant ?

Pas du tout \_\_\_\_\_ Tout à fait  
glissant glissant

5- Le volant vous semble t-il élégant ?

Pas du tout \_\_\_\_\_ Tout à fait  
élégant élégant

6- Concernant la position de vos bras lors de la conduite, indiquez s'ils sont trop tendus ou trop fléchis.

Trop tendus \_\_\_\_\_ Trop fléchis

7- Indiquez dans quelle mesure vous estimez la taille du volant.

Petit \_\_\_\_\_ Grand

8- Indiquez dans quelle mesure vous estimez la rigidité du volant.

Souple \_\_\_\_\_ Rigide

9- Indiquez dans quelle mesure vous estimez le poids du volant.

Léger \_\_\_\_\_ Lourd

10- Le volant gêne t-il votre vision de la route ?

Aucune gêne \_\_\_\_\_ Gêne totale

11- En conduisant avez-vous souvent regardé le volant ?

Jamais \_\_\_\_\_ Souvent

12- La direction assistée est-elle confortable ?

Pas du tout \_\_\_\_\_ Tout à fait  
confortable confortable

13- Trouvez-vous le volant agréable au toucher ?

Désagréable \_\_\_\_\_ Très agréable

14- Y a t-il du jeu dans le volant?

Pas de jeu \_\_\_\_\_ Beaucoup  
du tout de jeu

15- Concernant la rigidité de la direction assistée, indiquez si vous trouvez que la direction est trop dure ou trop souple.

Trop dure \_\_\_\_\_ Trop souple

16- En tournant, la résistance qu'offre le volant est-elle confortable ?

Pas du tout \_\_\_\_\_ Tout à fait  
confortable confortable

17- Une fois que vous avez tourné le volant, la manière dont il revient à sa position de départ est-elle confortable ?

Pas du tout \_\_\_\_\_ Tout à fait  
confortable confortable

18- En tournant le volant, ressentez-vous une gêne ?

Aucune \_\_\_\_\_ Gêne totale  
gêne



## Questionnaire 2

1- En tournant le volant, ressentez-vous une gêne ?

Aucune  Gêne totale  
gêne

2- Une fois que vous avez tourné le volant, la manière dont il revient à sa position de départ est-elle confortable ?

Pas du tout  Tout à fait  
confortable confortable

3- En tournant, la résistance qu'offre le volant est-elle confortable ?

Pas du tout  Tout à fait  
confortable confortable

4- Concernant la rigidité de la direction assistée, indiquez si vous trouvez que la direction est trop dure ou trop souple.

Trop dure  Trop souple

5- Y a t-il du jeu dans le volant?

Pas de jeu  Beaucoup  
du tout de jeu

6- Trouvez-vous le volant agréable au toucher ?

Désagréable  Très agréable

7- La direction assistée est-elle confortable ?

Pas du tout  Tout à fait  
confortable confortable

8- En conduisant avez-vous souvent regardé le volant ?

Jamais  Souvent

9- Le volant gêne t-il votre vision de la route ?

Aucune gêne  Gêne totale

10- Indiquez dans quelle mesure vous estimez le poids du volant.

Léger \_\_\_\_\_ Lourd

11- Indiquez dans quelle mesure vous estimez la rigidité du volant.

Souple \_\_\_\_\_ Rigide

12- Indiquez dans quelle mesure vous estimez la taille du volant.

Petit \_\_\_\_\_ Grand

13- Concernant la position de vos bras lors de la conduite, indiquez s'ils sont trop tendus ou trop fléchis.

Trop tendus \_\_\_\_\_ Trop fléchis

14- Le volant vous semble t-il élégant ?

Pas du tout \_\_\_\_\_ Tout à fait  
élégant élégant

15- En conduisant, le volant est-il glissant ?

Pas du tout \_\_\_\_\_ Tout à fait  
glissant glissant

16- Votre position de conduite est-elle confortable ?

Pas du tout \_\_\_\_\_ Tout à fait  
confortable confortable

17- L'inclinaison du volant est-elle confortable ?

Pas du tout \_\_\_\_\_ Tout à fait  
confortable confortable

---

18- Le positionnement des mains sur le volant se fait-il naturellement ?

Pas du tout \_\_\_\_\_ Tout à fait  
naturellement naturellement

**Annexe 3 :** Tableau récapitulatif des écarts à la consigne, écarts type et scores de performance.

sujets	Ecart moy				Ecart abs moy				Ecart type				Score			
	V38_p1	V38_p2	VN_p1	VN_p2	V38_p1	V38_p2	VN_p1	VN_p2	V38_p1	V38_p2	VN_p1	VN_p2	V38_p1	V38_p2	VN_p1	VN_p2
AH	2,67	-0,84	0,39	-0,10	12,15	11,68	12,55	12,25	17,81	16,43	18,33	17,77	96,8	97,4	97	98,1
SP	-1,04	0,96	-1,84	-1,23	9,10	9,35	9,70	8,81	12,95	14,08	13,57	12,87	99,2	98,9	99,3	99,3
SK	-0,14	-0,02	-0,66	-0,57	6,39	6,88	6,69	7,73	10,48	10,56	9,97	11,82	99,3	100	95,5	99,9
PN	-2,09	0,49	-1,21	0,28	7,52	6,53	8,93	6,87	17,60	10,29	23,34	10,88	98,6	99,6	99,2	99,5
IB	0,84	2,15	1,05	-0,28	10,58	10,04	9,35	9,08	16,70	14,39	13,97	12,25	99	99,3	98,8	99,1
MU	-1,89	1,48	-1,88	1,83	10,16	12,27	9,95	9,69	14,78	30,87	14,33	15,66	96,1	95,9	95,4	96,5
MG	-0,93	0,14	-1,24	-1,22	12,07	11,19	11,79	9,97	19,63	17,41	19,82	14,43	97,6	99,3	98,9	99,9
AM	-1,21	0,25	-1,26	0,87	16,41	15,59	11,00	11,63	25,39	26,49	17,36	20,02	93	92	97,3	96,1
PH	-1,31	-1,25	-1,53	-1,12	10,63	11,28	16,18	14,28	17,69	17,25	26,84	22,09	94,2	96,4	95,1	96,8
BG	-1,83	-1,96	-1,23	-1,58	9,03	9,32	11,79	10,52	15,09	15,15	16,02	15,07	95,6	96,9	97,4	98,7
DA	-0,97	-0,58	-0,97	-0,62	9,06	7,90	10,20	9,36	13,32	11,21	15,19	13,27	95,1	98,2	98,1	99,6
NG	-1,11	-1,01	-0,91	-1,71	8,60	8,05	12,38	9,97	14,42	12,33	21,44	15,39	92,6	94	96,2	97,3
MG	-0,93	0,14	-1,24	-1,22	12,07	11,19	11,79	9,97	19,63	17,41	19,82	14,43	97,7	99,3	98,9	99,9
AP	-0,45	-1,66	-0,96	-1,34	13,53	11,97	12,78	13,21	21,13	19,85	20,96	19,79	96	97	97,5	98,2
YG	-1,78	0,80	0,94	1,21	15,70	12,89	13,73	10,95	30,77	21,74	25,92	18,70	92,8	95,2	92,8	95,9
JH	1,92	2,27	0,30	-1,11	15,17	15,32	14,58	17,09	26,26	25,21	21,65	32,48	94,6	92,2	95,3	92,8
EH	-1,04	-1,44	-0,28	-0,93	10,78	10,48	12,10	11,05	15,68	15,38	18,56	15,94	92,5	95,6	94,3	96,4
TL	1,03	0,25	1,74	1,56	10,25	10,02	12,37	9,67	14,62	14,16	17,45	13,54	97,8	99,2	99,3	99,3
CS	-1,89	0,29	-2,30	-2,25	9,30	8,96	10,80	10,45	14,01	13,20	15,28	15,37	98,3	98,4	98,7	99
CH	-0,54	-1,57	0,00	0,06	8,06	9,13	9,85	9,08	12,24	14,01	14,15	13,38	98,8	99	99	98,9
PJ	-2,33	-1,10	-2,19	-2,07	10,16	8,68	8,05	7,23	14,07	12,35	11,47	10,42	99,2	99,4	99,6	99,7
MA	2,67	-0,84	0,39	-0,10	12,15	11,68	12,55	12,25	17,81	16,43	18,33	17,77	97,7	99,4	99,9	99,7
JL	-1,02	-0,32	0,40	0,76	11,68	9,40	9,68	9,41	18,75	13,43	14,18	13,48	96,7	99,2	99	99,4
DH	-1,45	-1,58	-2,95	-1,73	11,31	9,52	8,75	8,02	19,71	13,83	12,86	11,91	97,3	99,2	98,6	99,3
moy	-0,70	-0,20	-0,64	-0,45	10,60	10,05	10,65	9,86	17,13	15,98	16,81	15,15	96,52	97,54	97,55	98,30

**Annexe 4 : Résultats des grilles d'observations**

Les résultats des grilles d'observation ne montrent pas de différence significative entre les volants. Par contre, elles mettent en avant des différences sur la pose des mains entre les groupes.


- Temps de maintien du volant :

Variable T1 (en s)	Volant normal		Volant 3 branches		Comparaisons
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	
Sujets					Effet « volant » : NS Effet « sujets » : NS Interaction NS  Remarque : diminution de T1 chez les pathos
Contrôles	111,75	15,45	113,67	16,80	
Agés	109,43	22,66	112,04	14,37	
Pathologiques	81,81	44,53	81,44	41,25	

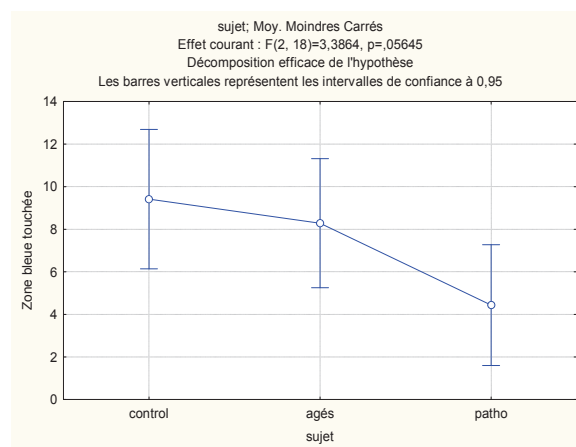
Variable T2 (en s)	Volant normal		Volant 3 branches		Comparaisons
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	
Sujets					Effet « volant » : NS Effet « sujets » : NS Interaction NS  Remarque : augmentation de T2 chez les pathos
Contrôles	53,34	15,83	50,83	17,41	
Agés	57,03	22,82	52,81	15,74	
Pathologiques	81,67	44,91	82,86	41,24	

- Position des mains sur le volant :

Le tableau suivant récapitule les moyennes et écart-types du nombre de fois où le conducteur a touché la zone bleue (quart bas gauche) du volant.


Zone bleue main gauche (nb de fois)	Volant normal		Volant 3 branches		Comparaisons
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	
					
Sujets					Effet « volant » : NS
Contrôles	11,1	3,8	7,6	3,2	Effet « sujets » : $p=0,05$ , $F=3,38$
Agés	9,8	5,6	6,7	5,8	Interaction : $p=0,02$ , $F=4,42$
Pathologiques	3,5	3,1	5,3	3,2	Remarque : effet volant à $p=0,07$

Les sujets pathologiques touchent en général, moins la zone bleue du volant que les autres (Fig. 37).

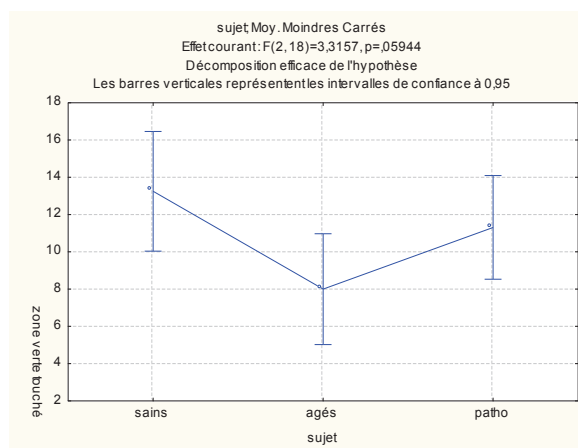


**Fig. 71: Nombre de fois où la zone bleue est touchée pour les trois groupes**

Le tableau suivant récapitule les moyennes et écart-types du nombre de fois où le conducteur a touché la zone verte (quart haut gauche) du volant.


Zone verte main gauche (nb de fois) 	Volant normal		Volant 3 branches		Comparaisons
	Sujets	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	
Contrôles	13,5	5,6	13	5,4	Effet « volant » : NS Effet « sujets » : $p=0,05$ , $F=3,31$ Interaction : NS Remarque : les sujets âgés touchent moins cette zone
Agés	8,8	2,9	7,1	4,5	
Pathologiques	11,5	4,5	11,1	2,9	

Les sujets âgés touchent en général, moins la zone verte (quart haut gauche) du volant que les autres groupes (Fig. 72).




**Fig. 72 : Nombre de fois où la zone verte est touchée pour les trois groupes**

Le tableau suivant récapitule les moyennes et écart-types du nombre de fois où le conducteur a touché la zone rouge (quart haut droit) du volant.

Zone rouge main droite (nb de fois) 	Volant normal		Volant 3 branches		comparaisons
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	
Sujets					Effet « volant » : NS Effet « sujets » : NS Interaction : NS  Remarque : gros écart type !
Contrôles	10,1	6,9	12,5	4,8	
Agés	10,1	4,5	10,3	5	
Pathologiques	11,3	12,2	10	5,4	

Le tableau suivant récapitule les moyennes et écart-types du nombre de fois où le conducteur a touché la zone jaune (quart bas droit) du volant.

Zone jaune main droite (nb de fois) 	Volant normal		Volant 3 branches		comparaisons
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	
Sujets					Effet « volant » : NS Effet « sujets » : NS Interaction : NS  Remarque : gros écart type !
Contrôles	15,1	5,1	11,1	6,5	
Agés	8,4	3,6	8,6	2,5	
Pathologiques	10,8	8,3	8,5	4,5	

**Annexe 5 : Mini Mental State Examination (MMSE)**

Le MMSE est un test de dépistage et de suivi des déficiences cognitives. Il évalue l'orientation, l'attention, la mémoire, l'expression verbale et écrite, la compréhension verbale et écrite et les performances visuo-spatiale. La valeur seuil généralement retenue pour le dépistage des démences est de 23.

NOM

PRENOM

Date de naissance

DATES

Test 1     
 Test 2     
 Test 3

ORIENTATION	Test				Test		
	1	2	3		1	2	3
1 Quel jour de la semaine sommes-nous ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	6 Où sommes-nous ici ? (hôpital...)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2 Quelle est la date aujourd'hui ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	7 A quel étage sommes-nous ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3 En quel mois sommes-nous ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	8 Dans quelle ville sommes-nous ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4 En quelle saison sommes-nous ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	9 Dans quel département sommes-nous ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5 En quelle année sommes-nous ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10 Dans quel pays sommes-nous ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

TOTAL (0 à 10)

APPRENTISSAGE

11. 12. 13. Faites répéter les mots suivants : citron, porte, crayon (à prononcer au rythme d'un mot par seconde, 1 point par mot, répétez les mots jusqu'à ce qu'ils soient appris, relever le nombre d'essais), 1 point par bonne réponse. 3 points.

ATTENTION ET CALCUL MENTAL

14. 15. 16. 17. 18. Comptez à partir de 100 en retirant 7 à chaque fois (à faire 5 fois de suite). Si impossible épelez le mot LARGE à l'envers (le score correspond au nombre de lettres à la bonne place). 5 points.

MEMOIRE

19. 20. 21. Vous souvenez-vous des trois mots que vous avez répétés tout à l'heure ? 3 points.

LANGAGE

22. 23. 24. Qu'est-ce que c'est que cela ? (Montrer un crayon). 1 point. Qu'est-ce que c'est que cela ? (Montrer la montre). 1 point. Répétez, "Pas de siné de mois". 1 point.

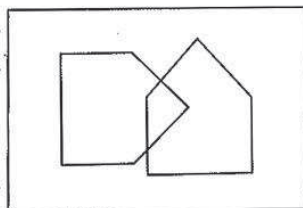
25. 26. 27. Faire exécuter au sujet les 3 ordres successifs suivants, "Prenez cette feuille de papier, pliez-la par le milieu, et posez-la par terre". 3 points.

28. Lisez et faites ce qu'il y a sur cette feuille de papier ("fermez vos yeux"). 1 point.

29. Écrivez une phrase de votre choix sur cette feuille. 1 point.

ACTIVITE MOTRICE

30. Copiez ce dessin sur une feuille. 1 point.



SCORE GLOBAL



## **Annexe 6 : Décharge sujet pour la participation au protocole VolHand**

Afin de renseigner le sujet sur les modalités de l'expérimentation, un formulaire d'information et de consentement est distribué en début de manip.

### **Formulaire de consentement éclairé**

Madame/Monsieur, nous désirons vous informer sur cette étude afin de vous permettre de nous donner votre consentement éclairé à votre participation. Vous êtes libres d'accepter ou de refuser de participer à cette recherche.

#### Objectif de l'étude

L'objectif du projet VolHand est de constituer une base de données pour la tâche de tourner le volant. Celle-ci sera utilisée pour déterminer des indices pertinents qui permettront ultérieurement d'identifier des profils fonctionnels de conducteurs. Le but visé par cette étude sera d'adapter le système de direction assistée aux capacités physiques de chacun, et donc aux profils fonctionnels identifiés.

#### Modalités pratique et contrainte

Pour satisfaire les besoins de l'étude, environ 150 conducteurs volontaires sont sélectionnés dans trois catégories : sujets sains (sans troubles musculaires ou articulaires dans les membres supérieurs), sujets âgés (conducteur de plus de 70, en bonne santé physique et qui conduisent régulièrement) et les sujets pathologiques (différentes pathologies qui affectent la motricité du membre supérieur cf § IV).

Les sujets sont sollicités sur une séance de 1h30 au total. Le temps de l'expérimentation est de 20 min, le reste du temps est réparti entre l'accueil, l'équipement et le recueil des impressions du sujet via des questionnaires.

L'expérimentation consiste à suivre une consigne de tourner le volant dans un simulateur de conduite. Le temps de mesure est réparti en 6 scénarii de 2 min avec un temps de pause de 1 min entre chaque série.

Une collation ainsi qu'une gratification sont prévues pour tous les participants à l'étude.

#### Risques encourus

Les marqueurs et électrodes EMG utilisées sont collées sur la peau à l'aide de scotch double face hypoallergénique. Si des effets néfastes (allergie au scotch) apparaissent pendant l'étude, ceux-ci seront soigneusement évalués pour décider de la continuité de l'étude.

#### Confidentialité

Les données recueillies par les questionnaires et l'examen physique seront strictement confidentiels et ne serviront que pour l'analyse. Les résultats publiés resteront anonymes.

#### Retrait de l'étude

Vous pouvez vous retirer en tout temps de cette étude sans conséquence négative.

#### Personne à contacter en cas de problème

Suite à la lecture des informations ci-dessus, vous pouvez poser toute question pour préciser un terme, sur le déroulement de l'étude. Si vous avez des questions, difficultés avec les questionnaires, si vous changez d'adresse ou pour toute raison pouvant empêcher le bon déroulement de l'étude, vous pouvez contacter la personne responsable de l'étude.

Exemplaires de ce formulaire de consentement éclairé.

Il y aura 3 exemplaires de ce formulaire de consentement signé, soit un pour vous, un pour le dossier de recherche et un dernier pour l'établissement où a lieu l'expérimentation.

Consentement éclairé

Je soussigné(e), Monsieur, Madame, Mademoiselle

Nom..... Prénom .....

Adresse .....

.....

accepte volontairement de participer à l'étude du projet VolHand.

Avoir été pleinement informé de la nature du test, de son objectif, de sa durée et des attentes vous concernant. Vous avez été averti des éventuels désagréments et risques qui pourraient en résulter.

Avoir eu la possibilité de poser des questions sur tous les aspects du protocole et avoir compris les réponses qui vous ont été transmises.

Accepter de suivre toutes les instructions qui vous seront données pendant le test et de remettre les questionnaires fournis à la fin du test.

Accepter que les données enregistrées à l'occasion de ce test puissent faire l'objet d'un traitement informatisé. Vous êtes informé qu'en application de la loi modifiée « Informatique et Liberté » du 6 janvier 1978, vous pourrez demander l'accès aux données vous concernant et la rectification de celles-ci. Vous acceptez de ne pas restreindre l'utilisation qui sera faite des résultats du test et en particulier, vous acceptez que ces résultats puissent être divulgués dans le monde entier, sachant que votre identité ne sera pas

Etre informé de votre possibilité de vous retirer du test à tout moment, sans condition.

Garantir la confidentialité des informations qui seront portées à votre connaissance. Cette clause restera en vigueur tant que les informations ne seront pas tombées dans le domaine public.

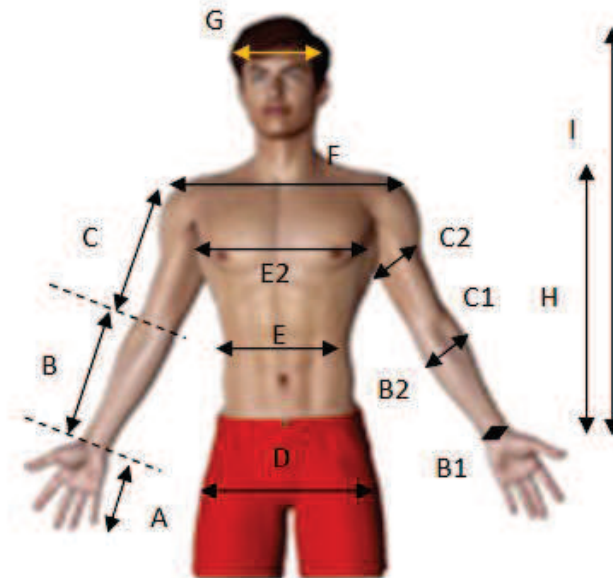
Fait à Valenciennes, le

Signature

précédée de la mention « lu et approuvé – bon pour accord »

**Annexe 7 : Mesures anthropométriques**

Pour le calcul des centres de masses, les données anthropométriques du sujet sont nécessaires. Le détail des mesures prises pour notre étude est présenté sur le schéma suivant.



Taille :

Masse :

Code	Nomination	Mesure en cm
A	Longueur main	
B	Longueur avant bras	
C	Longueur bras	
D	Largeur hanche	
E	Largeur taille	
F	Largeur épaule	
F1	Epaisseur buste	
H	Longueur buste	
I	Longueur buste + tête	

B1	Tour poignet	
B2	Tour av bras proximal	
C1	Tour bras distal	
C2	Tour bras proximal	
D1	Tour hanche	
E1	Tour taille	
E2	Tour buste	
G	Tour de tête	

**Annexe 8 : Questionnaire du protocole VolHand**

Comme pour l'annexe 2, ce questionnaire se décompose en deux parties : dans une première partie les informations générales par rapport au sujet sont recueillies puis dans une seconde partie le confort, la position des mains, la difficulté, les douleurs/gênes occasionnées ainsi que la fatigue et l'apprentissage sont testés. La consigne donnée dans le formulaire en annexe 2 est reprise.

**1/ Informations générales**

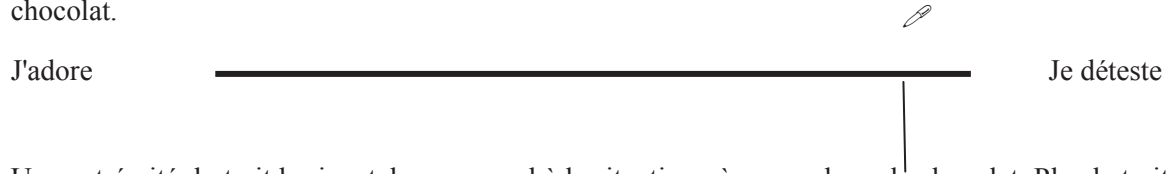
- ✓ Vous êtes :  une femme  un homme
  - droitier  gaucher
- ✓ Taille (m) : Poids (Kg) : Age : ans Vision corrigée :  Oui  Non
- ✓ En quelle année avez-vous obtenus le permis B :
- ✓ Possédez-vous d'autres permis de conduire ?  A  C  D  E(B)  E(C)  E(D)
- ✓ Indiquez votre kilométrage habituel en tant que conducteur de voiture. Selon la formule que vous trouvez la plus simple pour vous, rapportez ce kilométrage à la durée de votre choix (par an, par mois, ou par semaine). Km, par
- ✓ Principalement (plusieurs réponses possibles) :
  - Sur autoroute
  - Sur route
  - En ville
  - Autre
- ✓ Avec quelle fréquence utilisez-vous votre voiture :
  - Tous les jours, ou presque
  - 2/3 fois par semaine
  - Une fois par semaine
  - Moins d'une fois par semaine
- ✓ Quelle est votre voiture actuelle (marque et type) ?
- ✓ De quel type de transmission est équipée votre voiture actuelle ?
  - Boite manuelle à rapports
  - Boite automatique
  - Boite séquentielle
- ✓ Combien avez-vous eu de voiture depuis ces 15 ans dernières années ?

### 1/ Consignes au participant

Nous vous proposons d'utiliser une sorte de règle qui permet de mesurer vos impressions liées à l'utilisation du volant au cours du trajet que vous venez de réaliser.

L'intensité de votre ressenti ou votre degré d'approbation peut être défini par un trait vertical tracé sur l'échelle comme dans l'exemple ci-dessous :

Exemple- Aimez-vous le chocolat ? Marquez l'échelle pour indiquer dans quelle mesure vous aimez le chocolat.



Une extrémité du trait horizontal correspond à la situation où vous adorez le chocolat. Plus le trait que vous allez tracer est proche de cette extrémité, plus vous aimez le chocolat. L'autre extrémité correspond à la situation où vous détestez le chocolat. Plus le trait est proche de cette extrémité, moins vous aimez cet aliment.

Nous vous proposons maintenant de faire quelques essais (non pris en compte) afin de vous habituer aux questions et à l'échelle de réponse qui vous seront proposées dans la suite du questionnaire.

Essai 1 (*pour vous familiariser avec l'échelle*) - Pouvez-vous situer le centre de l'échelle ?



Essai 2 (*pour vous familiariser avec l'échelle*) - Pouvez-vous situer les 2/3 de l'échelle ?



Essai 3 (*pour vous familiariser avec l'échelle*) - Pouvez-vous situer le 1/4 de l'échelle ?



Essai 3 (*pour vous familiariser avec les questions*) - Regardez-vous souvent la télévision ?



## 2/ Informations par rapport au volant

Confort / inconfort

La tâche vous a-t-elle paru ennuyeuse ?

Très amusante \_\_\_\_\_ Très ennuyeuse

Votre position de conduite est-elle confortable ?

Pas du tout \_\_\_\_\_ Tout à fait confortable

Le positionnement des mains sur le volant se fait-il naturellement ?

Pas du tout \_\_\_\_\_ Tout à fait naturellement

La direction assistée est-elle confortable ?

Pas du tout \_\_\_\_\_ Tout à fait confortable

La direction assistée est-elle bien adaptée à votre conduite ?

Trop souple \_\_\_\_\_ Trop rigide

Le retour automatique du volant dans sa position initiale vous paraît-il bon/réaliste ?

Pas du tout \_\_\_\_\_ Très réaliste

Avez-vous ressenti des difficultés à réaliser la tâche de tourner-de-volant ?

OUI

NON

Si oui, s'agit-il :

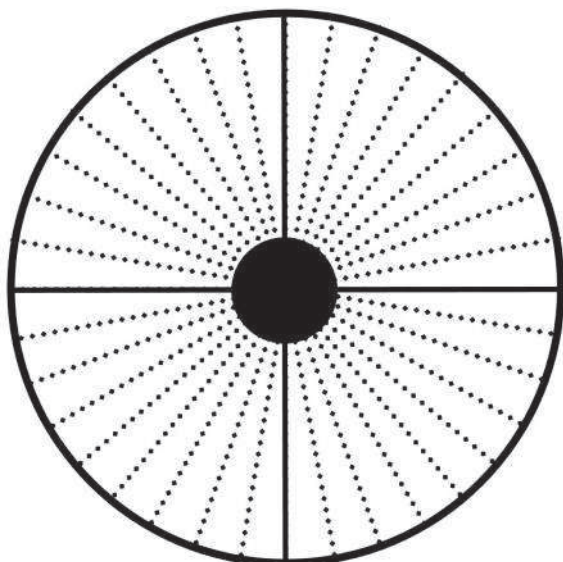
D'un problème articulaire ? (Je ne peux pas aller plus haut/plus loin)

D'un problème musculaire ? (Je n'ai pas la force)

D'une douleur ? (J'ai mal)

### Position des mains sur le volant

Avant que le participant ne sorte du véhicule, lui demander de placer ses mains sur le volant dans sa position de « repos » et indiquer sur le schéma ci-dessous la position des mains :



Remarques :

### Difficultés motrices et Gêne

Nous allons maintenant vous poser des questions concernant la gêne et la douleur que vous avez pu ressentir au cours de la tâche. Attention, nous allons vous poser des questions identiques concernant tout d'abord la « gêne » que vous avez pu ressentir, c'est-à-dire une difficulté à réaliser la tâche mais qui peut avoir lieu sans douleur. Puis nous vous poserons des questions en ce qui concerne la douleur que vous avez pu ressentir, elle-même pouvant être accompagnée ou non d'une gêne... Vous verrez qu'il est parfois difficile de différencier les 2, mais tentez de répondre le plus sincèrement possible.

Gêne

En position de repos, les mains sur le volant, ressentez vous une gêne ?

Pouvez-vous positionner sur cette échelle le niveau de gêne au repos ?

Pas de gêne

Gêne  
maximale



Est-il possible de localiser cette gêne au repos ?



Pouvez-vous caractériser cette gêne au repos ?

Gêne furtive

Gêne qui dure



Lorsque vous avez commencé l'exercice de tourner-de-volant avez-vous ressenti une gêne?

Pouvez-vous positionner sur cette échelle le niveau de gêne ?

Pas de gêne



Gêne  
maximale

Pouvez-vous localiser cette gêne ?



Pouvez-vous caractériser cette gêne ?

Gêne furtive

Gêne qui dure

Cette gêne a-t-elle augmenté ou diminué au fur et à mesure de la tâche ?

Pouvez-vous positionner sur cette échelle le niveau de gêne ?

gêne diminuée  
(disparue)



Gêne  
augmentée  
(maximale)

Pouvez-vous localiser les zones où la gêne a augmenté s'il y a lieu ?



Est-ce que d'autres gênes sont apparues au cours de la réalisation des manœuvres ?

OUI

NON

Pouvez vous localiser cette(ces) gêne(s) ?



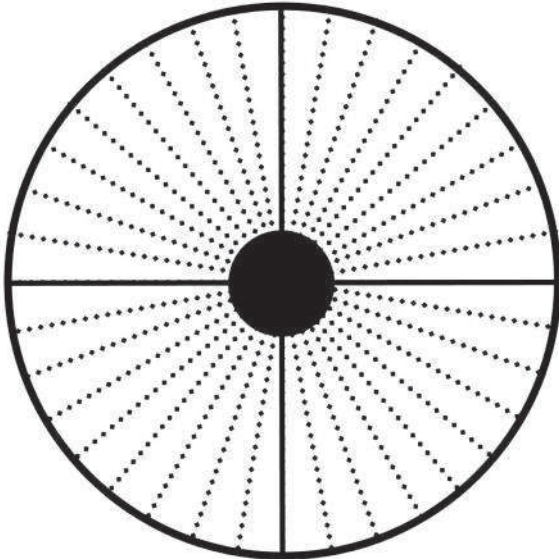
Avez-vous été gêné par la répétition des manœuvres ?

Pas du tout \_\_\_\_\_

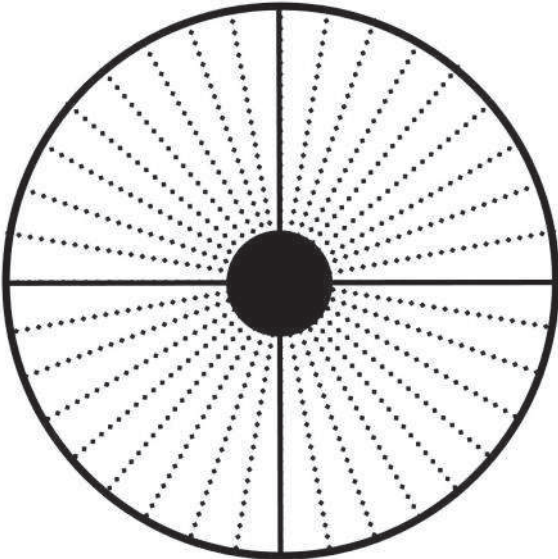
Très gêné

Pouvez-vous hachurer sur le schéma ci-dessous les zones angulaires pour lesquelles le mouvement du volant vous semble difficile à cause d'une gêne :

MAIN GAUCHE



MAIN DROITE



### **Douleurs**

Nous allons maintenant vous poser des questions concernant la douleur que vous avez pu ressentir au cours de la tâche.

En position de repos, les mains sur le volant, ressentez-vous une douleur ?

Pouvez-vous positionner sur cette échelle le niveau de douleur au repos ?

Pas de  
douleur



douleur  
maximale  
imaginable

Est-il possible de localiser cette douleur au repos ?



Pouvez-vous caractériser cette douleur au repos ?

Coupure

Broyage

Tiraillement

Compression

Douleur qui ronge

Irritation

Piqûre

Pincement

Autre : .....

Lorsque vous avez commencé l'exercice de tourner-de-volant avez-vous ressenti une douleur?

Pouvez-vous positionner sur cette échelle le niveau de douleur ?

Pas de \_\_\_\_\_ douleur maximale imaginable

Pouvez-vous localiser cette douleur ?



Pouvez-vous caractériser cette douleur ?

Coupure

Broyage

Tiraillement

Compression

Douleur qui ronge

Irritation

Piqûre

Pincement

Autre : .....

Cette douleur a-t-elle augmenté ou diminué au fur et à mesure de la tâche ?

Pouvez-vous positionner sur cette échelle le niveau de douleur ?

douleur  
diminuée  
(disparue)



Douleur  
augmentée  
(maximale)

Pouvez-vous localiser les zones où la douleur a augmenté s'il y a lieu ?



Est-ce que d'autres douleurs sont apparues au cours de la réalisation des manœuvres ?

OUI

NON

Pouvez-vous localiser cette(ces) douleur(s) ?



Avez-vous ressenti des douleurs à cause de la répétition des manœuvres ?

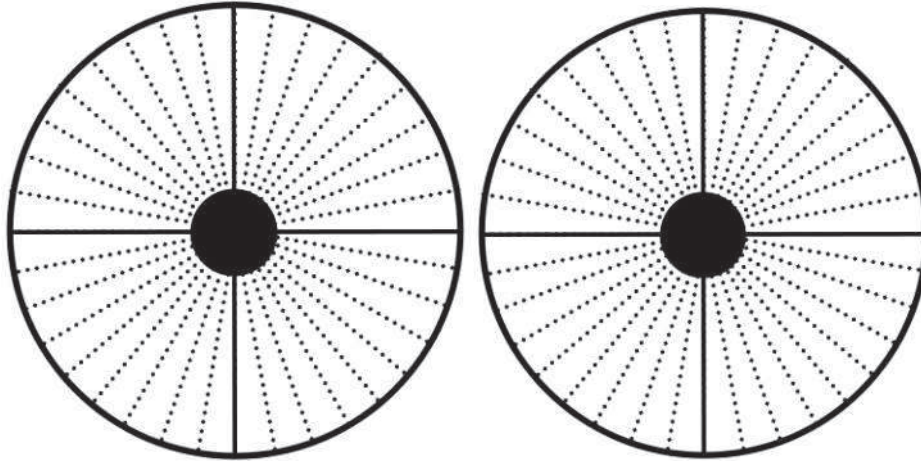
OUI

NON

Pouvez-vous hachurer sur le schéma ci-dessous les zones angulaires pour lesquelles le mouvement du volant vous semble difficile à cause d'une douleur :

MAIN GAUCHE

MAIN DROITE



Fatigue / Apprentissage

Avez-vous trouvé la tâche plus facile à la fin qu'au début ?

Plus facile à la fin \_\_\_\_\_

Plus difficile à la fin

Pensez-vous avoir mieux réussi à la fin qu'au début ?

Mieux réussi \_\_\_\_\_

Moins bien réussi

Vous sentez-vous fatigué maintenant ?

Pas du tout fatigué \_\_\_\_\_

Très fatigué

Cette fatigue est-elle :

physique ?

attentionnelle ?

## **Annexe 9** : Estimation de la position de l'épicondyle médial de l'humérus

Un système optoélectronique de type Vicon<sup>®</sup> est utilisé et des marqueurs en nombre suffisant sont disposés sur les membres supérieurs des sujets afin de calculer les angles articulaires conformément aux recommandations de l'International Society of Biomechanics (ISB, (Wu, van der Helm et al. 2005)). Malgré l'attention portée aux expérimentations et les 10 caméras utilisées, la diversité des stratégies motrices mises en place par les sujets (Schiro, Gabrielli et al. 2011) et les contraintes environnementales liées au simulateur automobile retenu ne permettent pas une mesure à chaque instant du marqueur médial de l'épicondyle de l'humérus. L'angle de flexion/extension du coude ne peut donc plus être calculé selon l'ISB. L'objectif est d'apporter une solution à cette problématique spécifique.

### **A9.1 Méthode**

Un sujet (29 ans, 187cm, 89kg), équipé de 12 marqueurs (C7, incisure jugulaire (IJ), processus xiphoïde, T8, l'acromion, l'épicondyle médial (EM), l'épicondyle latéral (EL), styloïde ulnaire (US), styloïde radial (RS), rotateur du bras (RotB) et les métatarses 2 et 5 (M2, M5) a pris part aux expérimentations. Le centre articulaire de l'épaule (CEp) est calculé par sphère fitting après une pré-expérimentations (Gamage and Lasenby 2002), avec les marqueurs EL, EM, US et RotB : le rotateur du bras. Assis sur une chaise, ce sujet avait pour consigne de tourner un volant disposé devant lui sur une table. Tous les marqueurs sont visibles par les 10 caméras. Trois repères Rt1, Rt2 et Rt3 sont définis :

Rt1 d'axe X orthogonal au plan formé par CEp, EL et US

Rt2 d'axe X orthogonal au plan formé par CEp, EL, RS

Rt3 d'axe X orthogonal au plan formé par CEp, EL, RotB

- A  $t=0$ , les coordonnées 3D du marqueur EM, obtenues initialement dans le repère de laboratoire RL, sont exprimées dans les repères Rt1, Rt2 et Rt3. Ces coordonnées sont notées respectivement  $EMRt1(t=0)$ ,  $EMRt2(t=0)$  et  $EMRt3(t=0)$ .
- Pour tout  $t>0$ , les coordonnées 3D  $EMRt1(t=0)$ ,  $EMRt2(t=0)$  et  $EMRt3(t=0)$  sont exprimées dans le repère de laboratoire, RL. Ces coordonnées sont notées respectivement  $EMRt1(t>0)$ ,  $EMRt2(t>0)$  et  $EMRt3(t>0)$ .

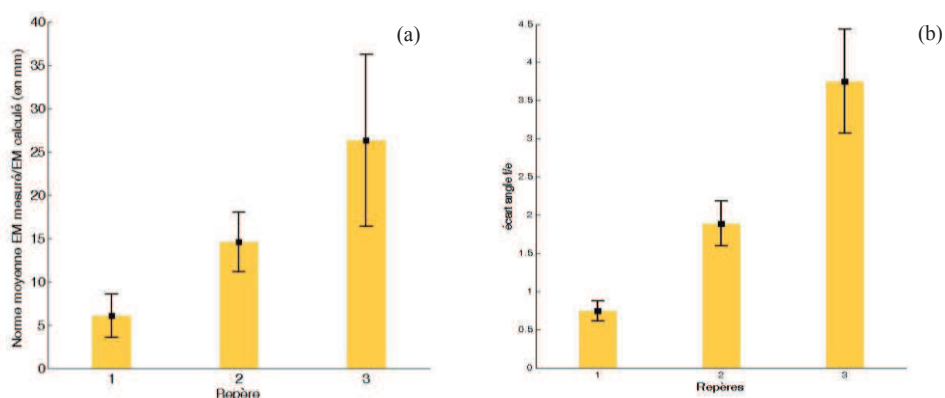
Dans un premier temps, les coordonnées 3D  $EMRt1(t>0)$ ,  $EMRt2(t>0)$  et  $EMRt3(t>0)$  sont comparées à  $EM(t>0)$ , les coordonnées 3D de EM mesuré dans RL lorsque  $t>0$ .

Dans un second temps, l'angle de flexion/extension du coude calculé selon les recommandations de l'ISB, d'une part en considérant  $EM(t)$  et d'autre part en considérant successivement  $EMRt1(t>0)$ ,  $EMRt2(t>0)$  et  $EMRt3(t>0)$  sont comparés.

### **A9.2 Résultats**

La Fig. 73a présente les erreurs moyennes et les écart-types calculés entre  $|EM(t)|$  et  $|EMRt1(t>0)|$ ,  $|EMRt2(t>0)|$  et  $|EMRt3(t>0)|$ . Les erreurs moyennes (resp. les écarts types) sont égales à 6,03mm (resp. 2,51), 14,57mm (resp. 3,42) et 26,28mm (resp. 9,93) respectivement.





**Fig. 73 : Moyenne et écart type a) entre  $|EM(t)|$  et  $|EMRt1(t>0)|$ ,  $|EMRt2(t>0)|$  et  $|EMRt3(t>0)|$  et b) sur le calcul d'angle f/e à partir de EM mesuré et EM estimé.**

La figure 110b présente l'erreur entre l'angle de flexion/extension du coude calculé en considérant  $EM(t)$  et l'angle de flexion/extension en considérant  $EMRt1(t>0)$ ,  $EMRt2(t>0)$  et  $EMRt3(t>0)$ . L'erreur moyenne est égale à  $-0,56^\circ$ ,  $-1,83^\circ$  et  $3,53^\circ$  respectivement.

### A9.3 Conclusion

L'occultation du marqueur médial de l'épicondyle de l'humérus ne permet pas d'appliquer les recommandations de l'ISB directement afin de calculer l'angle de flexion/extension du coude lors d'une tâche de tourner le volant. Ces travaux ont montré qu'il était possible d'en obtenir une bonne estimation à condition que les marqueurs disposés en CEp, EL et US soient visibles.



---

## **CHAPITRE 3**

# **INTERACTIONS MAINS/VOLANT - METHODE ET RESULTATS**

---

## 1. Introduction

Dans ce chapitre, l'analyse de l'interaction cinématique main / volant est réalisée. L'objectif est d'identifier différents profils de conducteurs dans notre population de sujets sains lors de manœuvres à basse vitesse. Pour répondre à cet objectif, les coordonnées 3D des mains sur le volant sont analysées en 2 étapes :

- La première étape propose une analyse du déplacement des mains dans le plan du volant et vise à le caractériser. Une interprétation graphique en densitogramme est construite pour visualiser le mouvement des mains sur le volant. Un indicateur numérique est proposé pour la classification objective des conducteurs dans un profil d'appartenance.
- La deuxième étape s'intéresse à la pose des mains sur le volant. Cette étape utilise un découpage flou du volant pour comparer les poses de mains inter et intra sujet. Une Analyse Factorielle des Composantes Multiples (AFCM) est ensuite réalisée pour mettre en évidence les différences intra et inter conducteurs à partir des zones du volant sollicitées, d'abord pour chacune des mains puis pour les deux mains simultanément.

Ce chapitre est composé de 2 parties. Une première partie étudie le mouvement des mains sur le volant puis sa pose dans une seconde partie.

## 2. Analyse spatiale du mouvement des mains : les densitogrammes

Cette partie tente au travers d'une analyse globale du mouvement des mains dans le plan du volant, d'identifier différents profils de mouvement des mains. Pour cela le déplacement des mains sur le volant est étudié à partir des coordonnées des mains dans le plan du volant et d'une représentation graphique en densitogramme. Le but de cette représentation est de comprendre par l'observation, les différents mouvements effectués par les mains et de définir des profils de conducteurs. Pour cela, un indicateur numérique est créé pour classer objectivement les conducteurs dans différents profils.

### 2.1. Méthode

#### 2.1.1. Positions des mains dans le plan de volant

- Définissons  $R_v$  le repère du volant (Chap. 2, §3.2.1) avec l'axe X horizontal vers la droite, l'axe Y vertical vers le haut et l'axe Z parallèle à la colonne de direction orienté vers le conducteur et d'origine  $O_v$ , le centre du volant. Soit  ${}^vP_{vic}$  la matrice de passage du repère vicon  $R_{vic}$  au repère du volant  $R_v$  peut s'écrire :

$${}^vP_{vic} = \begin{bmatrix} [X_{vi} \ X_{vj} \ X_{vz}]_{vic} \\ [Y_{vi} \ Y_{vj} \ Y_{vz}]_{vic} \\ [Z_{vi} \ Z_{vj} \ Z_{vz}]_{vic} \end{bmatrix} \quad 3.1$$

avec les coordonnées des vecteurs unitaires du repère  $R_v$  dans le repère  $R_{vic}$ .

Dans cette étude, les coordonnées 3D du point milieu M des marqueurs du 2<sup>ème</sup> et du 5<sup>ème</sup> métatarse, notées  $(OM)_{vic}$ , sont considérés comme représentatives de la position de la main. Les coordonnées de la main dans le repère  $R_v$  s'obtiennent par changement de repère (eq 3.2).

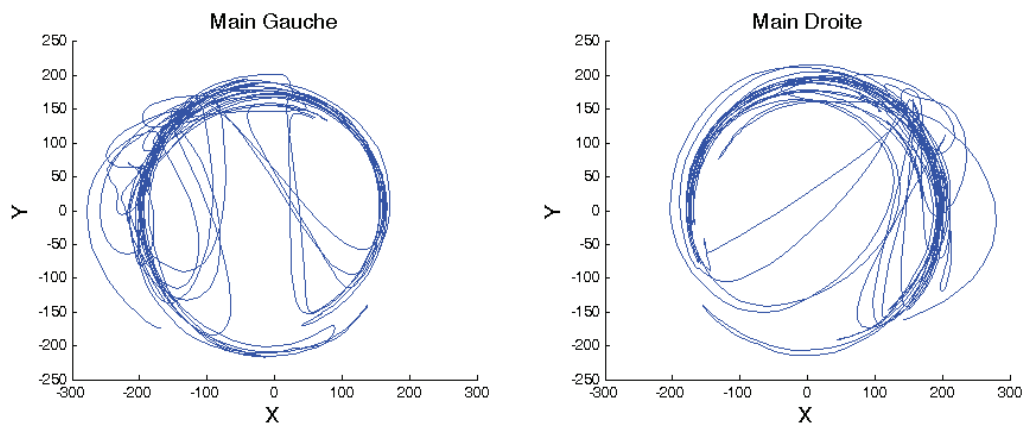
$$(O_v M)_v = {}^v P_{vic} \cdot (O_v M)_{vic} = {}^v P_{vic} \cdot ((O_{vic} M)_{vic} - (O_{vic} O_v)_{vic}) \quad 3.2$$

avec  ${}^v P_{vic}$  matrice de passage du repère Vicon au repère du volant.

La main est considérée dans le plan du volant lorsque les coordonnées de la main respectent les conditions suivantes :

- $Z_M \leq 5\text{cm}$
- et  $12,3 \leq \sqrt{X_M^2 + Y_M^2} \leq 20,5 \text{ cm}$ . Ces bornes ont été définies à partir : du rayon du volant (18,5 cm) et de l'épaisseur moyenne de la main (environ 2 cm) pour la borne supérieure et du rayon du volant moins l'épaisseur de la section de l'anneau du volant (3,2 cm) et de la main

Les déplacements sur l'axe Z sont négligés lorsque la main est sur le volant. La trajectoire de la main dans le plan du volant est la succession des coordonnées planaires de la main lorsque t (temps) varie (Fig. 74).



**Fig. 74 : Déplacement de la main gauche et droite dans le plan du volant pour un sujet pendant un scénario**

### 2.1.2. Représentation en densitogrammes

Ce mode de représentation a été utilisé dans l'étude biomécanique du lever de charge (Bouilland 1997). Le densitogramme permet de visualiser le déplacement de la main sur le volant et de mettre en évidence les zones du volant sur sollicitées. Le principe consiste :

- à découper le plan du volant à l'aide d'une matrice composée de fenêtres bi dimensionnelles (ici, pour une étude exploratoire, retenir 250 cases de 1 cm<sup>2</sup> chacune constitue un bon compromis pour notre étude),
- à comptabiliser le nombre de passage d'une main dans chaque case de ce quadrillage,
- à associer une couleur à chaque case en fonction du nombre de passage dans celle-ci.

Chacune de ces cases est ensuite caractérisée par une nuance de gris, en fonction du nombre de passage dans la case. Les couleurs retenues varient du noir (pas de passages) au blanc (maximum de passages pour le scénario de conduite étudié). La Fig. 75 illustre ce principe.

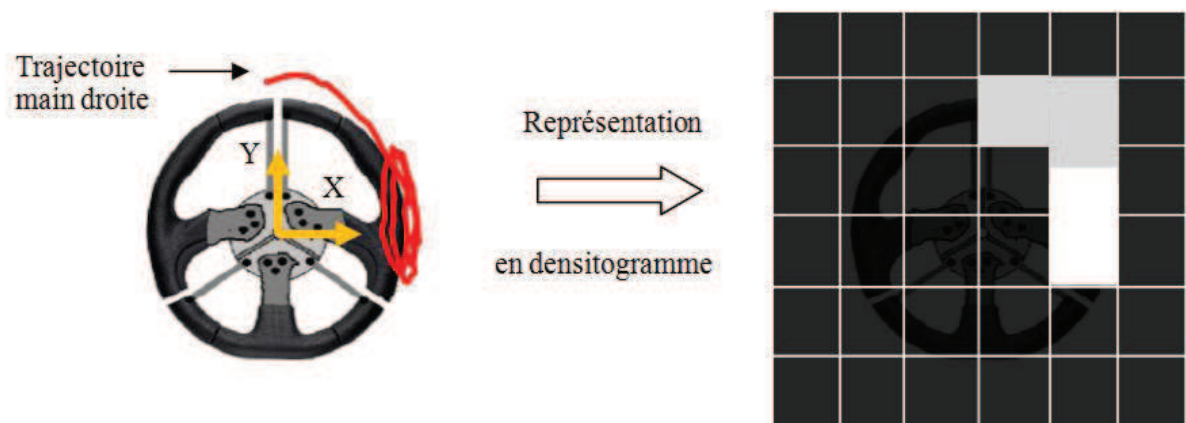


Fig. 75: Principe de construction du densitogramme

Cette représentation en densitogramme est réalisée pour les 6 scénarios de conduite et pour chaque main. Elle est donc représentative de la trajectoire de la main pendant 2mn.

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet une visualisation rapide du mouvement de la main sur le volant. Cependant, elle ne permet pas de différencier de manière objective les différents profils. En complément à cette représentation graphique, un indicateur numérique de la position de la main sur l'axe-X (axe horizontal) est construit.

### 2.1.3. Indicateur numérique $I_n$ pour définir les profils

Le côté droit et le côté gauche du volant sont les zones correspondant respectivement, aux valeurs négatives et positives de l'axe-X. L'indicateur numérique  $I_n$  est le pourcentage de temps où la main se trouve du côté opposé au volant. Il est noté %Md→g quand la main droite se trouve à gauche du volant et défini par 3.3. Inversement, il est noté %Mg→d pour la main gauche et décrit par l'équation 3.4.

$$I_n = \%Md \rightarrow g = \frac{t_{Xd < 0}}{t_{scénario}} \times 100 \quad 3.3$$

$$I_n = \%Mg \rightarrow d = \frac{t_{Xg > 0}}{t_{scénario}} \times 100 \quad 3.4$$

où  $t_{Xd < 0}$  (resp.  $t_{Xg > 0}$ ) est le temps durant lequel la coordonnée X de la main droite (resp. gauche) est négative (resp. positive) et  $t_{scénario}$  vaut 2 minutes.

#### 2.1.4. Statistiques

Une étude statistique est réalisée afin de montrer si le pourcentage de temps moyen passé par les mains des conducteurs, respectivement à droite ou à gauche du volant, est différent selon le scénario. Elle est réalisée sur les indicateurs  $\%Md \rightarrow g$  et  $\%Mg \rightarrow d$  calculés au court des 6 scénarios de conduite, avec pour hypothèse nulle : il n'y a pas de différences significatives entre les scénarii de conduite. Les données ne suivant pas une loi normale (test de Lilliefors sur les  $I_n$  de tous les sujets pour chaque scénarii,  $p < 0.05$ ), un test non paramétrique est utilisé. Tous les sujets ont fait par ailleurs les 6 scénarios de conduite, les données sont donc appariées (elles portent sur le même échantillon). Par conséquent, une ANOVA de Friedman est retenue pour étudier l'hypothèse H1, il y a des différences significatives entre les scénarii de conduite ( $p > 0.05$ ).

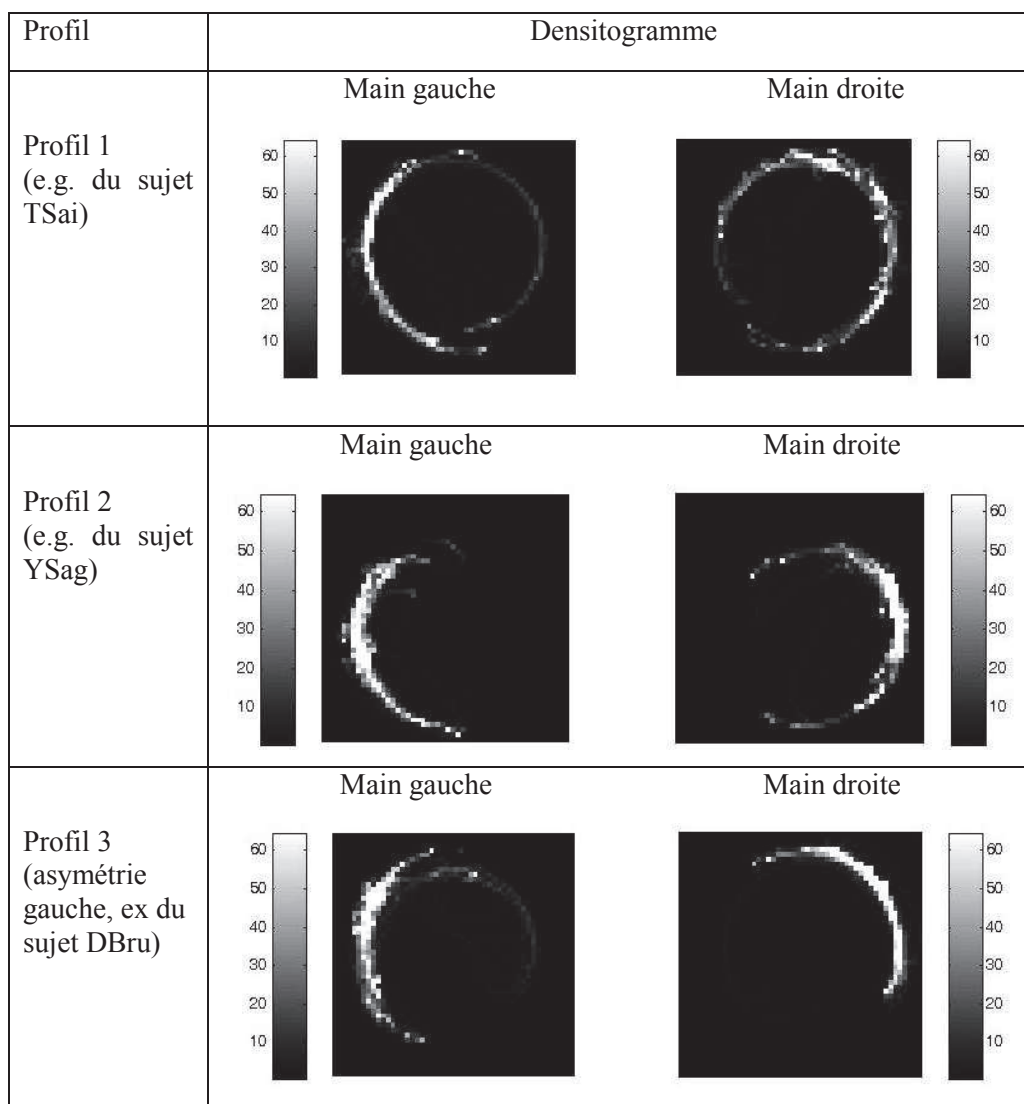
## 2.2. Résultats

### 2.2.1. Densitogrammes

Trois profils de pose de mains ont été trouvés. Le Tableau 17 présente des exemples de densitogrammes types pour chaque profil :

- Le premier profil montre des « traces claires » de chaque côté du volant pour chaque main. Ceci est significatif d'un positionnement non négligeable de la main droite (resp. gauche) du côté gauche (resp. droit) du volant.
- Le deuxième profil est caractérisé par l'absence de « traces claires » côté gauche pour la main droite et côté droit pour la main gauche, marquant un positionnement négligeable de la main droite du côté gauche du volant, et inversement.
- Enfin, le dernier profil présente, dans cet exemple, des « traces claires » à droite pour la main droite mais aucune à gauche pour la main droite, exprimant un positionnement non négligeable de la main droite du côté gauche du volant, et un positionnement négligeable de la main gauche du côté droit du volant. Inversement, l'asymétrie peut être du côté droit du volant.

**Tableau 17 : Exemple de représentation en densitogramme des trois profils existant dans la population de conducteurs sains (de 0 pas de passage de la main dans une case à 60 nombre de passage max. dans une case)**

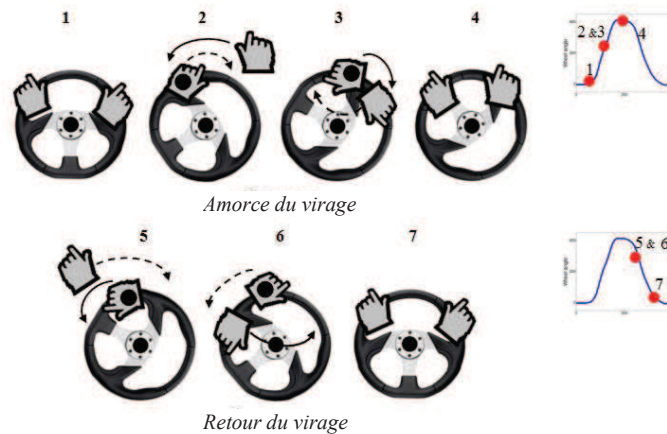


Les vidéos correspondantes aux différents profils sont étudiées. Les profils sont alors nommés comme suit : les croiseurs (profil 1 ou ‘C’), les non croiseurs (profil 2 ou ‘NC’) et les croiseurs asymétriques (profil 3 ou ‘AC’). Les noms des profils sont inspirés de la littérature (cf. Chap 1, § 3.1). Les figures 3, 4 et 5 illustrent les stratégies de positions de main de ces trois profils :

1/ Le conducteur croiseur (Fig. 76) maintient le volant en position initiale avec les 2 mains à 10h et 2h (1). A l’amorce du virage à droite, il pousse le volant avec la main gauche et amène la main gauche dans la partie droite du volant. Pendant ce temps, la main droite lâche le volant pour passer au dessus de la main gauche et prendre le relais en tirant le volant. Les deux mains se retrouvent croisées sur le volant (2). Ainsi, la main gauche peut revenir à sa position initiale, à gauche du volant et maintenir le volant dans cette position, à l’angle maximum du virage (3). Pour la phase de retour des roues dans l’axe de la voiture, le conducteur utilise la même stratégie mais en commençant, cette fois-ci, par la

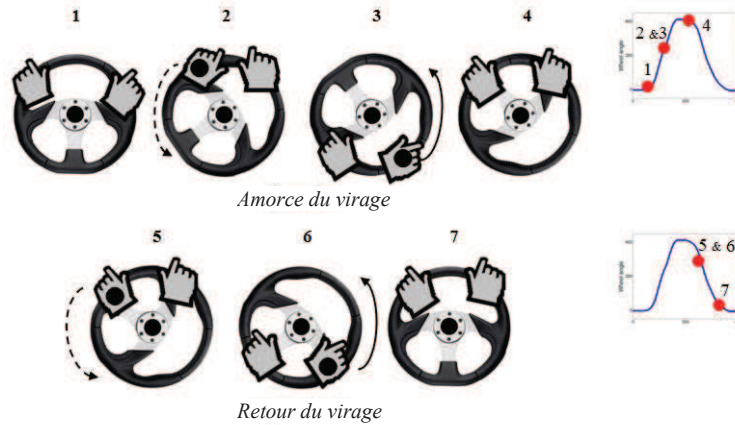


main droite. La main droite pousse le volant (4) sur 180°. La main gauche passe au dessus de la main droite pour prendre le relais de celle-ci (5) afin qu'elle puisse se replacer du côté droit du volant (6).



**Fig. 76: Description d'un profil croiseur dans un virage simple droite 90. La main marquée d'un point noir est celle qui reste sur le volant. Les flèches pleines montrent le déplacement de la main droite et les flèches en pointillés, le déplacement de la main gauche. La courbe bleue indique l'angle au volant du virage.**

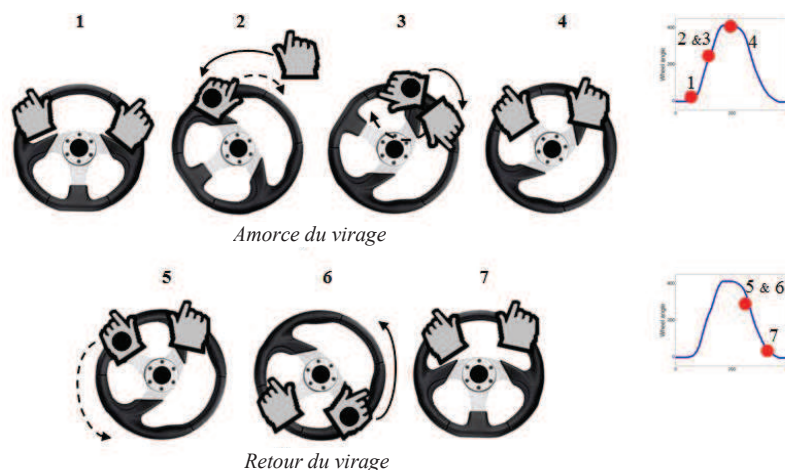
2/ La Fig. 77 illustre le profil non croiseur dans un virage simple (droit 90). Pour ce profil la main droite ne passe que très rarement au dessus de la main gauche et vice et versa. Dans la ligne droite, le conducteur a les mains à 9h et 3h (1). Pour initier le virage, il monte la main droite sur la partie haute du volant, à 12h (2). Il tire sur  $\frac{1}{4}$  de tour avec la main droite et laisse glisser la main gauche dans la partie basse et gauche du volant (3). Ensuite, il pousse avec la main gauche, jusqu'à 11h55 et maintient le volant, dans cette position, avec la main droite (4). Pour le retour des roue dans l'axe de la voiture, il effectue la procédure inverse : la main gauche tire le volant sur  $\frac{1}{4}$  de tour et laisse glisser la main droite en partie basse et droite du volant pour tenir le volant dans cette position (5), pendant que la main gauche remonte (6) et recommence l'opération (7).



**Fig. 77 : Description d'un profil non croiseur dans un virage simple droite 90. La main marquée d'un point noir est celle qui reste sur le volant. Les flèches pleines montrent le déplacement de la main droite et les flèches en pointillés, le déplacement de la main gauche. La courbe bleue indique l'angle au volant du virage.**

3/ Le profil croiseur asymétrique (Fig. 78) dans un virage simple droit croise à l'amorce du virage mais n'adopte pas cette stratégie lors du retour roues droites. Pour ce profil, il existe d'autres combinaisons de stratégies comme :

- le croisé/1 main : le conducteur amorce le virage en croisant les mains mais ramène le volant avec une main lors du retour roues droites.
- le croisé/lâché : l'amorce du virage se fait toujours en croisant les mains sur le volant. Pour le retour roues droites, le conducteur laisse filer le volant entre les mains, qui revient seul en position initiale avec le retour d'effort.



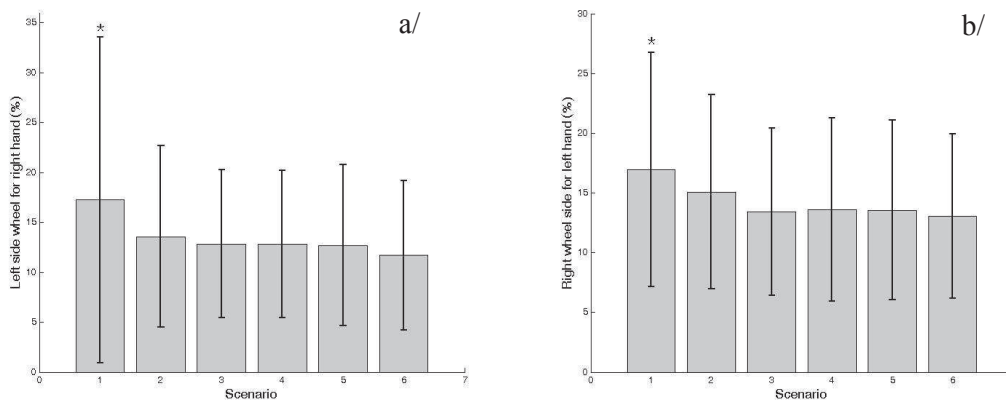
**Fig. 78 : Description d'un profil croiseur asymétrique dans un virage simple droite 90. La main marquée d'un point noir est celle qui reste sur le volant. Les flèches pleines montrent le déplacement de la main droite et les flèches en pointillés, le déplacement de la main gauche. La courbe bleue indique l'angle au volant du virage.**

### 2.2.2. Indicateur numérique

Cet indicateur  $I_n$  permet d'associer de manière objective un conducteur à un profil. Suite aux résultats précédents, les conventions suivantes sont adoptées :

- Un sujet est dit croiseur, noté C, lorsque  $I_n = \%Md \rightarrow g > 10\%$  et  $\%Mg \rightarrow d > 10\%$ .
- Un sujet est dit non croiseur, noté NC, lorsque  $I_n = \%Md \rightarrow g < 10\%$  et  $\%Mg \rightarrow d < 10\%$ .
- Un sujet est dit croiseur asymétrique, noté AC, lorsque  $I_n = (\%Md \rightarrow g < 10\%$  et  $\%Mg \rightarrow d > 10\%)$  ou  $I_n = (\%Md \rightarrow g > 10\%$  et  $\%Mg \rightarrow d < 10\%)$ .

Les Fig. 79a et b présentent la moyenne et l'écart type respectivement de  $\%Md \rightarrow g$  et de  $\%Mg \rightarrow d$  pour les 6 scénarii pour tous les sujets. Il semble que le scénario 1 induise des différences par rapport aux 5 autres scénarii.



**Fig. 79 : Moyenne et écart type a/ des  $\%Md \rightarrow g$  et b/  $\%Mg \rightarrow d$  pour tous les sujets dans les 6 scénarii.**

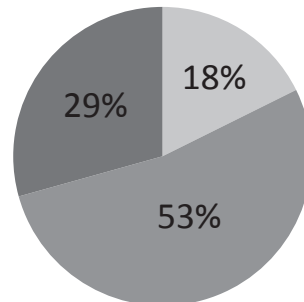
Ces observations sont confirmées par les résultats de l'ANOVA. Il y a des différences significatives entre les scénarii de conduite pour la main droite ( $F(23,5) = 12.07, p = 0.03$ ) et la main gauche ( $F(23, 5) = 10.13, p = 0.04$ ). Un test de comparaison de Wilcoxon à 2 échantillons appariés est réalisé afin d'identifier les répétitions significativement différentes. Ce test montre que le scénario 1 se différencie de tous les autres scénarii, aussi bien pour la main droite que la main gauche. Il a été écarté d'après l'hypothèse suivante : le temps d'habituation à la tâche n'est pas assez long pour que le conducteur ait une gestuelle stabilisée et naturelle (cf chap 1, §6.2). Il reste donc cinq scénarii de conduite (2, 3, 4, 5 et 6) sur lesquels une ANOVA de Friedman est menée. Les résultats montrent qu'il n'y a pas de différences significatives entre les scénarii de conduite pour les 2 mains ( $p = 0.30$  pour la main droite,  $p = 0.10$  pour la main gauche). Ceci est représentatif d'une constance dans les variances des  $I_n$  qui pourrait traduire une certaine répétabilité des sujets. Cependant, l'indice choisi est trop global pour étudier réellement les différences intra sujet. Il permet juste de mettre en évidence des stratégies différentes entre les conducteurs.

Dans la suite de cette étude, le scénario n°3 est choisi pour analyser les différents mouvements de mains sur le volant. Le Tableau 18 présente les %Md→g et %Mg→d pour le scénario de conduite n°3 pour chaque sujet.

**Tableau 18: Valeurs de %Md→g et %Mg→d pour tous les sujets sur le scénario 3.**

Sujets	%Md→g	%Mg→d
S1	18.02	10.05
S2	16.64	21.50
S3	8.54	7.68
S4	14.14	19.04
S5	11.90	14.24
S6	15.52	11.42
S7	1.09	3.26
S8	7.52	23.46
S9	12.70	12.64
S10	5.09	7.2
S11	3.46	10.37
S12	35.07	25.63
S13	10.43	6.27
S14	6.59	13.6
S15	20.70	18.08
S16	18.5	12.26
S17	9.57	16.87
S18	10.11	9.57
S19	11.17	23.71
S20	14.14	23.07
S21	20.58	12.38
S22	18.98	6.69
S23	4.35	0.06

La Fig. 80 montre la répartition des sujets en fonction de l'appartenance à un profil. Ces résultats montrent que 18% des participants de l'étude sont non croiseurs (NC), 29% de la population sont croiseurs asymétriques (CAS) et 53% de la population sont croiseurs C.



**Fig. 80: Répartition des différents profils chez les conducteurs sains participant à l'étude.**

### 2.3. Discussion

Les densitogrammes et l'indicateur numérique  $I_n$  ont permis de mettre en évidence trois profils de conducteurs sains, dans une situation de manœuvres à basse vitesse : les croiseurs, les non croiseurs et les croiseurs asymétriques. L'analyse statistique sur les différentes répétitions des scénarii de manœuvre à basse vitesse montre que le scénario 1 est différent des scénarii 2, 3, 4, 5 et 6. Pour ces scénarii, l'analyse de la variance sur les indices  $I_n$  de tous les sujets montre qu'il n'y a pas de différences. Comme observé dans la littérature (McGehee, Lee et al. 2004), les mouvements des mains sur le volant se sont stabilisés au moins après 240s de conduite (apprentissage + 1<sup>er</sup> scénario), soit, dans notre cas, à partir du 2<sup>ème</sup> scénario. Ces résultats semblent montrer que les conducteurs manipulent le volant avec une certaine répétabilité dans les mouvements des mains, après ce laps de temps. Pour autant, cette méthode ne permet pas de tester finement la répétabilité des conducteurs car la comparaison s'effectue sur le temps moyen que la main passe d'un côté ou de l'autre du volant. Par exemple, deux sujets croiseurs peuvent présenter un indicateur  $I_n$  identique et ne pas solliciter les mêmes zones du volant.

Les profils de mouvement de main en manœuvres à basse vitesse, dans cette étude, sont répartis de la manière suivante : 53% de croiseurs, 18% de non croiseurs et 29% de croiseurs asymétriques. Ces résultats sont cohérents avec les techniques de conduite enseignées dans les auto-écoles Françaises pour un meilleur contrôle du véhicule. Par contre, cette technique n'est pas la méthode recommandée dans d'autres pays. Par exemple aux USA, la NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration, chap1, §3.2.1) privilégie la stratégie non croiseur lors de manœuvres. L'intégrité physique du conducteur en est la principale raison : bien que la technique du croiseur soit reconnue par la NHTSA comme la technique offrant le meilleur contrôle du véhicule, elle est fortement déconseillée car elle peut entraîner de graves blessures lors de l'ouverture de l'airbag (Soffe, Quinlan et al. 2003), (Lundy and Lourie 1998).

Il est important de nuancer les résultats de cette étude. L'absence de trafic réduit considérablement la charge mentale de travail du conducteur : il n'a pas à être vigilant par rapport au trafic, à gérer sa vitesse ou à changer de vitesse. La littérature montre que ces paramètres peuvent influencer la position des mains lors de l'insertion dans un trafic dense (Thomas and Walton 2007; De Waard, Van den Bold et al. 2009). Il est possible que les stratégies de tourner le volant soient différentes en fonction du trafic dans une situation de manœuvres à basse vitesse.

## **2.4. Conclusion**

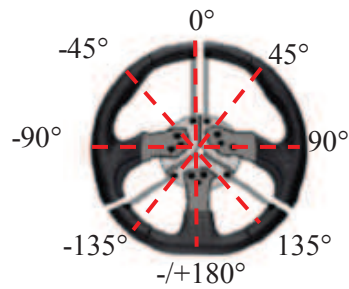
Cette partie a montré que l'analyse globale du mouvement des mains sur le volant permet de mettre en évidence 3 profils de conducteurs : les croiseurs, les non-croiseurs et les croiseurs asymétriques. Ces profils sont facilement reconnaissables à l'aide de la représentation du mouvement des mains par densitogramme. Grâce à un indicateur numérique, la classification objective des sujets dans un profil de conducteur est possible. Le profil dominant dans une situation de manœuvres à basse vitesse pour la population de conducteurs sains étudiée est le profil croiseur. Les résultats soulignent également qu'un conducteur ne change pas de profil après une familiarisation suffisante avec l'expérimentation. Ces résultats sont repris dans Schiro, Gabrielli et al. (2012 (b)). Néanmoins, l'analyse du mouvement des mains ne permet pas de vérifier la répétabilité intra sujet au niveau des zones du volant utilisées par les mains. Cette information apparaît importante pour comprendre le geste de tourner le volant et savoir si le conducteur change de profil lorsque le virage est différent. Pour cela, l'analyse de l'interaction cinématique main/volant doit être plus précise. La partie suivante présente l'analyse spatiale de la pose des mains.

## **3. Analyse spatiale de la pose des mains**

Cette partie introduit la méthode utilisée pour décrire les différences de poses des mains des conducteurs sains sur le volant, en situation de manœuvres à basse vitesse. Ces différences sont identifiées à partir de l'analyse des zones discriminantes du volant (i.e. différences inter-sujets) et de l'étude de la répétabilité de la pose de mains entre les virages et d'une répétition d'un même virage à l'autre (i.e. différences intra-sujets) pour chacune des mains puis pour une main par rapport à l'autre. Pour cela un découpage original du volant est proposé et deux AFCM sont réalisées. L'analyse se déroule en deux parties : une partie où la main droite et la main gauche sont étudiées séparément et une deuxième partie où l'interaction main droite/main gauche est considérée. Les résultats de chacune des parties sont discutés.

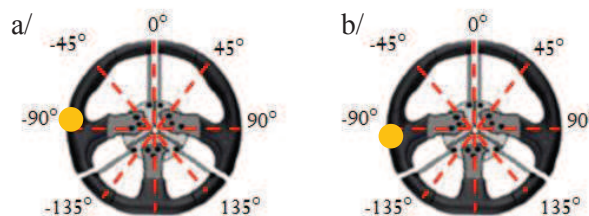
### **3.1. Découpage du volant**

Pour analyser la pose des mains sur le volant et déterminer les zones qui différencient les conducteurs, le volant est découpé en plusieurs zones. Le nombre de zones peut varier entre un découpage « grossier » en 2 parties du volant qui induit une perte d'informations considérable et un découpage trop précis (360° par exemple) qui rend l'analyse trop complexe. Dans la présente étude, un découpage du volant en 8 modalités est arbitrairement retenu car il offre un bon compromis entre un découpage grossier et trop précis (Fig. 81).



**Fig. 81 : Découpage du volant.**

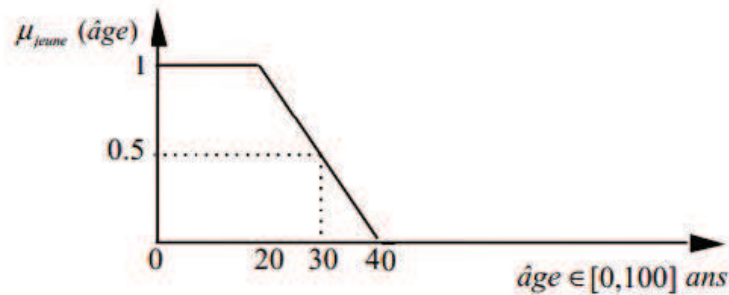
Le découpage du volant peut être binaire ou flou. Le découpage binaire limite la comparaison de la pose de main entre les conducteurs. En effet, si la main est positionnée à la limite inférieure d'une zone et à la répétition suivante, à la limite supérieure (Fig. 82) l'algorithme de calcul considère qu'il y a eu un saut de zone et donc que la main n'est pas au même endroit d'une répétition à l'autre. Cette comparaison est non représentative de la répétition du positionnement de la main car elle est trop discriminante. Pour éviter ces effets de bords, un découpage flou du volant est utilisé.



**Fig. 82 : Exemple de a/ position de la main gauche à un instant t dans un virage b/position de la main gauche au même instant t dans le même virage de deux scénarii différents : la main est « à peu près » au même endroit, la pose de main est-elle répétable ?**

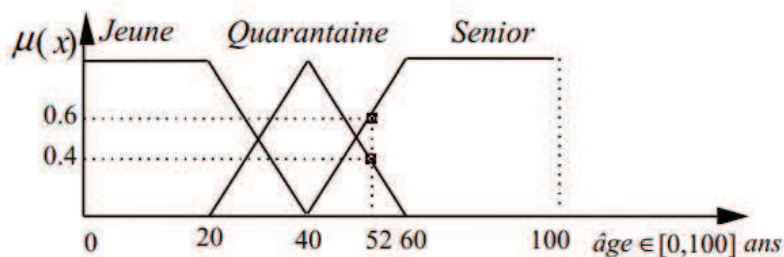
### 3.2. Définition du découpage en sous ensemble flou

Le découpage en sous ensembles flous (Zadeh 1965) s'oppose au découpage binaire classique où seul deux états d'appartenances sont possibles : soit un élément X appartient à un ensemble A, soit il n'y appartient pas. La théorie de la logique floue permet de graduer l'appartenance à un ensemble (entre 0 et 1), autorisant certains éléments à appartenir plus ou moins à un ensemble donné. Par exemple, pour modéliser l'appartenance à une population « jeune », il est possible de définir la population par le sous ensemble flou, ou modalité, présenté Fig. 83.



**Fig. 83: Définition floue d'une population jeune, avec en ordonnée  $\mu_{jeune}$  la valeur d'appartenance à la population « jeune » et en abscisse, l'âge.**

Avec cette modélisation, les personnes de moins de 20 ans sont considérées comme tout à fait jeunes (degré = 1), un voyageur ayant 30 ans est considéré comme plus ou moins jeune (degré = 0,5) mais les personnes de plus de 40 ans n'appartiennent plus à cet ensemble (degré = 0). Pour permettre la qualification de n'importe quelle personne qui vient à dépasser ces frontières, de nouvelles modalités peuvent être créées (Fig. 84). Grâce au chevauchement des modalités, une personne de 52 ans est considérée à la fois comme plutôt senior (degré = 0,6) et s'éloignant de la quarantaine (degré = 0,4). Ce chevauchement permet une appartenance graduée à un état telle qu'elle pourrait être verbalisée par un être humain : « je ne suis pas tout à fait vieux, mais plus tout à fait jeune ».



**Fig. 84 : Découpage floue avec trois modalités: "jeune", "la quarantaine", "sénior", avec  $\mu(x)$  la valeur d'appartenance à une modalité.**

Dans notre étude, le découpage spatial flou du volant est réalisé pour :

- éviter les pertes d'informations (Loslever, Guerra et al. 1997). En effet, l'analyse des moyennes ne donne pas d'informations sur les données d'origine. Par exemple, la moyenne d'âge de 20 à 60 ans est 40 ans mais la moyenne d'âge entre 30 et 50 ans est également 40 ans. Si les valeurs d'appartenances à un découpage flou (ex Tableau 19 avec les bornes petit(*P*)/moyen(*M*)/grand(*G*) de la modalité « *Quarantaine* ») sont utilisées, ces deux moyennes peuvent être différenciées :



**Tableau 19 : Exemple de différence entre le calcul d'une moyenne arithmétique et d'une valeur d'appartenance moyenne.**

-	- Entre 20 et 60 ans	- Entre 30 et 50 ans																																
- Moyenne arithmétique	40 ans	40 ans																																
- Valeur d'appartenance moyenne (VAM)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Bornes</th> <th><i>P</i></th> <th><i>M</i></th> <th><i>G</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>20 ans</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>60 ans</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td><b>VAM</b></td> <td><b>0.5</b></td> <td><b>0</b></td> <td><b>0.5</b></td> </tr> </tbody> </table>	Bornes	<i>P</i>	<i>M</i>	<i>G</i>	20 ans	1	0	0	60 ans	0	0	1	<b>VAM</b>	<b>0.5</b>	<b>0</b>	<b>0.5</b>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Bornes</th> <th><i>P</i></th> <th><i>M</i></th> <th><i>G</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30 ans</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>50 ans</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td><b>VAM</b></td> <td><b>0</b></td> <td><b>1</b></td> <td><b>0</b></td> </tr> </tbody> </table>	Bornes	<i>P</i>	<i>M</i>	<i>G</i>	30 ans	0	1	0	50 ans	0	1	0	<b>VAM</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
Bornes	<i>P</i>	<i>M</i>	<i>G</i>																															
20 ans	1	0	0																															
60 ans	0	0	1																															
<b>VAM</b>	<b>0.5</b>	<b>0</b>	<b>0.5</b>																															
Bornes	<i>P</i>	<i>M</i>	<i>G</i>																															
30 ans	0	1	0																															
50 ans	0	1	0																															
<b>VAM</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>																															

- pouvoir analyser des variables n'ayant pas la même unité (position de la main en degrés (°) et la présence des mains sur le volant qui est une variable qualitative) et comparer la position des mains inter et intra sujets (Loslever 1993)

Pour calculer les valeurs d'appartenance à une modalité ou zone du volant, la position angulaire de la main sur le volant doit être connue.

### 3.3. Calcul de la position angulaire de la main sur le volant

Les conditions énoncée §2.1.1 sont retenues pour considérer que les mains sont sur le volant. Lorsque la main n'est plus sur le volant :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{main} = NaN \text{ (Not A Number)} \quad 3.5$$

La position angulaire de la main *M* est calculée à partir des coordonnées mesurées du centre de la main (cf § 2.1.1) dans le repère  $R_v$ , selon l'équation 3.6.

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{X_M}{Y_M} \quad 3.6$$

Avec  $X_M$  et  $Y_M$  les coordonnées de la main dans le repère volant (Fig. 85) et  $\alpha$  compris entre  $-180^\circ$  et  $+180^\circ$ .

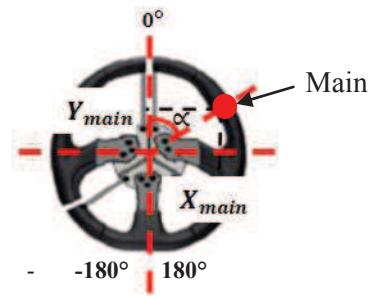


Fig. 85 : Position de la main dans le plan du volant.

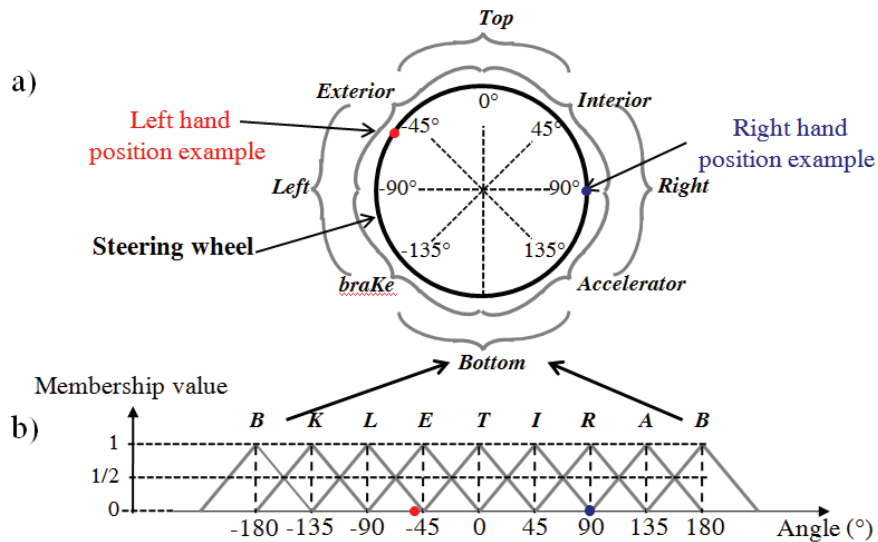
La position angulaire de la main peut être associée à une valeur d'appartenance d'un sous-ensemble flou.

### 3.4. Découpage des fonctions d'appartenance

Le découpage du volant en 8 modalités présenté § 3.1 est utilisé. Le découpage proposé prend également en compte la modalité « *la main n'est pas sur le volant* ». Dès lors, une lettre est associée à chacune des 9 modalités (soit 8 modalités sur le volant + 1 modalité présence de la main sur le volant, Fig. 86a), pour chaque main: 1) *L, B, R, T* respectivement pour les positions *Left, Bottom, Right, Top* et 2) les positions bas droite et bas gauche sont associées aux pédales dans un but mnémotechnique : *A* pour *Accelerator pedal* et *K* pour *brake pedal*. Les positions haut gauche et haut droite sont respectivement associées aux rétroviseurs *Extérieur* (lettre *E*) et *Intérieur* (lettre *I*). Quand la main ne touche pas le volant la modalité est notée *O*. Pour distinguer la main droite de la main gauche, des lettres majuscules et minuscules sont respectivement utilisées.

En résumé :

- Pour la main gauche, les modalités sont notées : *b,k,l,e,t,i,r,a*
- Pour la main droite, les modalités sont notées : *B,K,L,E,T,I,R,A*



**Fig. 86 :** a) Découpage du volant b) fonction d'appartenance de la position des mains droite et gauche dans l'exemple.

La Fig. 86b donne un exemple d'utilisation des fenêtres spatiales. Ici, la main gauche placée à  $-50^\circ$  (le point rouge sur la figure) est située dans la fenêtre spatiale E (i.e. *Exterior*), qui a pour borne inférieure  $a = -90$ , borne centrale  $b = -45$ , et borne supérieure  $c = 0$  et la main droite placée à  $90^\circ$  est située dans la fenêtre spatiale R (i.e. *Right*) qui a pour borne  $45^\circ$ .

Le Tableau 20 des valeurs d'appartenance pour ces positions de la main droite et de la main gauche est :

**Tableau 20 :** Tableau des valeurs d'appartenance de l'exemple figure 86a.

Modalités	B	K	L	E	T	I	R	A
Main gauche	0	0	0.2	0.8	0	0	0	0
Main droite	0	0	0	0	0	0	1	0

Il n'y a pas de fenêtres spatiales pour la modalité *O*. Elle est notée selon un codage binaire,  $1 =$  « la main est sur le volant » ou  $0 =$  « la main n'est pas sur le volant ».

Cette méthode permet de transformer les données qualitatives (i.e. la main est ou n'est pas sur le volant) et quantitatives (i.e. position angulaire de la main sur le volant) en un tableau de valeurs d'appartenance du signal à des fenêtres spatiales. Ces données sont maintenant homogènes. Ce tableau

peut être soumis à une Analyse Factorielle des Correspondances Multiples (AFCM) pour visualiser les variables discriminantes et les relations les plus marquantes du tableau de données.

### 3.5. Méthode d'analyse : l'Analyse Factorielle des Correspondances Multiples (AFCM)

Le but de l'AFCM est de résumer toutes les données par un nombre restreint de variables et de déterminer les proximités entre les situations pour en tirer des profils particuliers (Rouanet and Le Roux 1993). La base de données contient les valeurs d'appartenance des positions angulaires des deux mains dans les  $I \times J \times K = 20 \times 7 \times 6 = 840$  situations, avec  $I, J$  et  $K$  respectivement, le nombre de sujets, le nombre de virages et le nombre de répétition d'un virage (due à la réalisation des 6 scénarii). La procédure d'analyse de cette base se décompose en 5 étapes (Loslever 2001) :

1/ *caractérisation des données* : la position angulaire de la main sur le volant est associée à un ensemble de valeurs d'appartenance comme décrit au § 3.2. Pour les signaux des  $20 \times 7 \times 6 = 840$  situations des deux mains, les moyennes des valeurs d'appartenance sur le temps mis pour réaliser une situation sont calculées (Loslever 1993).

2/ *codage des données* : les observations qualitatives « la main est ou n'est pas sur le volant » et les observations quantitatives de la position angulaire de la main sur le volant, sont maintenant sur une même base regroupant les 9 modalités. Les données sont homogènes, aucun codage n'est donc à appliquer.

3/ *Mise en forme des tableaux de données* : construction d'un tableau à double entrée, de  $I \times J \times K = 840$  lignes et  $(2 \times 9) + (9 \times 9) = 99$  colonnes.

4/ *Analyse des tableaux de données* : l'Analyse Factorielle des Correspondances Multiples a été réalisée sur le tableau de données créé en 3/. L'AFCM est effectuée sur le tableau des valeurs d'appartenance des positions angulaires de la main sur le volant aux fenêtres spatiales floues. La base de données générée par l'étude est découpée en tableaux illustratifs pour chaque sujets  $i$ , virages  $j$  et scénario  $k$ . Un tableau illustratif permet de mieux mettre en évidence l'influence des facteurs en se concentrant sur 1 facteur  $i, j, k$  en particulier.

5/ *présentation des résultats* : une représentation graphique pour simplifier les résultats de l'AFCM est proposée. Elle représente le volant et son découpage. A chaque modalité est associé un histogramme quantifiant le taux d'occupation de la zone par chacune des mains.

Cette démarche est utilisée dans les deux études :

- Sans interaction des 2 mains : une première AFCM est effectuée main droite puis main gauche, soit  $2 \times 9 = 18$  modalités. Elle vise à mettre en évidence la répétabilité inter (i.e. quelles sont les zones du volant discriminantes ?) et intra-sujet (i.e. est-ce que les zones sollicitées sur le volant sont identiques quel que soit virage ? est-ce que les zones sollicitées sur le volant sont identiques pour la même répétition d'un virage ?)

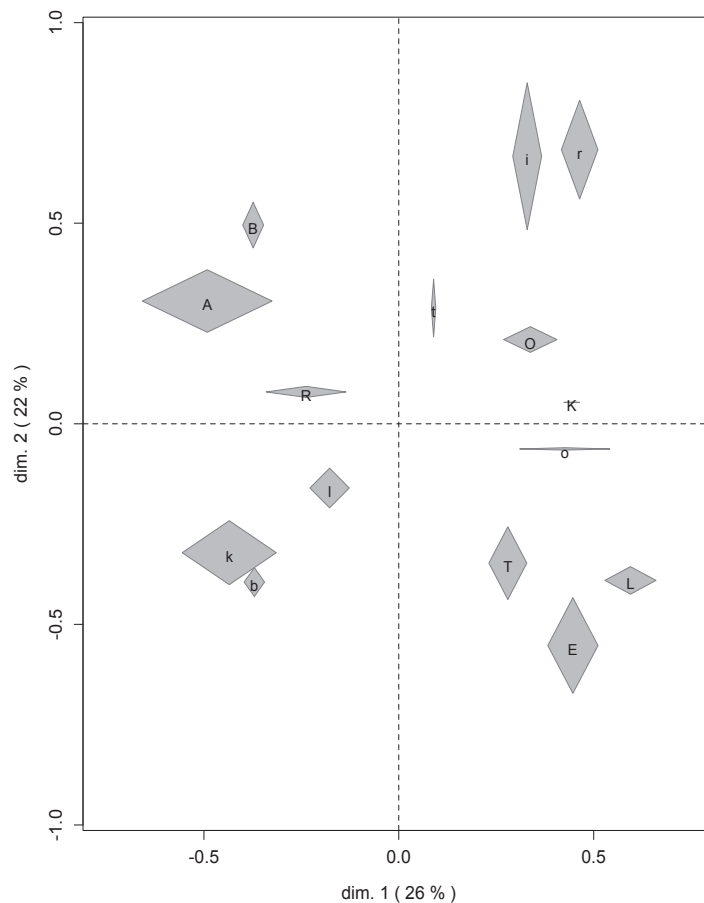
- Avec interaction des 2 mains : la deuxième analyse s'intéresse à l'interaction des 2 mains, soit  $(8+1) \times (8+1) = 81$  modalités pour comprendre l'action d'une main par rapport à l'autre selon les zones du volant sollicitées.

### 3.5.1. Analyse des résultats

- Sans interaction des 2 mains.

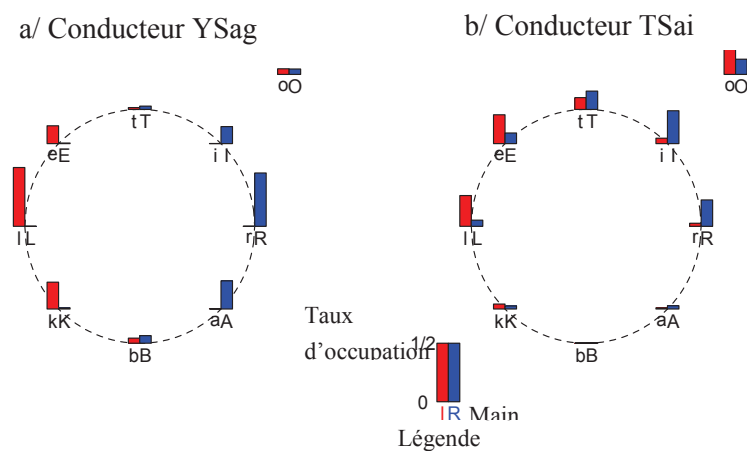
Cette étude s'intéresse au tableau des valeurs d'appartenance de la position angulaire des mains, comportant 840 lignes ( $20 \times 7 \times 6$ ) et 18 colonnes ( $2 \times 9$ ). Elle vise à décrire la répétabilité intra et inter sujets au niveau de la pose des mains (droite ou gauche) sur le volant et les zones discriminantes du volant. Le premier plan factoriel (axe horizontal) représente 26% de l'inertie totale et 22% pour le deuxième axe (Fig. 87).

L'axe 1 met évidence les modalités du volant à observer pour discriminer les triplets  $i, j, k$ . Cet axe est principalement contrôlé par les modalités  $A, k, o$  et  $R$  : il oppose la modalité  $o$  fortement présente à droite de l'axe aux modalités  $A, k$  et  $R$  situées à gauche (Fig. 87).



**Fig. 87 : AFM sans interaction des 2 mains pour les 9 modalités. Lorsque le grand axe du losange est parallèle à l'axe 1 (resp. axe 2) alors la variable est discriminante sur cet axe. Le grand axe du losange correspond à la contribution de la modalité par rapport à l'axe du plan factoriel avec lequel il est parallèle.**

Les résultats de l’AFCM pour chaque sujet sont présentés en annexe 1. Les positions des mains de 2 sujets opposés sur l’axe 1 sont décrites dans la suite de l’analyse pour illustrer les différences entre les conducteurs à partir des variables discriminantes. YSag avec un taux d’occupation important des modalités *A*, *R* et *k* se positionne bien à gauche de l’axe 1 alors que TSai avec une forte sollicitation de la modalité *o* se situe dans la partie droite de l’axe 1 (Annexe 1). En moyenne sur tous les virages et toutes les répétitions, le conducteur YSag garde la main gauche dans la moitié gauche du volant et la main droite dans la moitié droite. La zone centrale du volant (soit les modalités *l* et *R*) est la plus sollicitée respectivement par les mains gauche et droite (Fig. 88a). A contrario, pour le conducteur TSai, c’est la moitié haute du volant qui est plus sollicitée. Les mains ne restent pas dans leurs moitiés respectives de volant : la main droite utilise aussi le quart haut gauche du volant et la main gauche le quart haut droit du volant. Ce comportement impose que la modalité « main hors du volant » soit plus utilisée (Fig. 88b). Ces observations sont confirmées par les données initiales (Annexe 2).

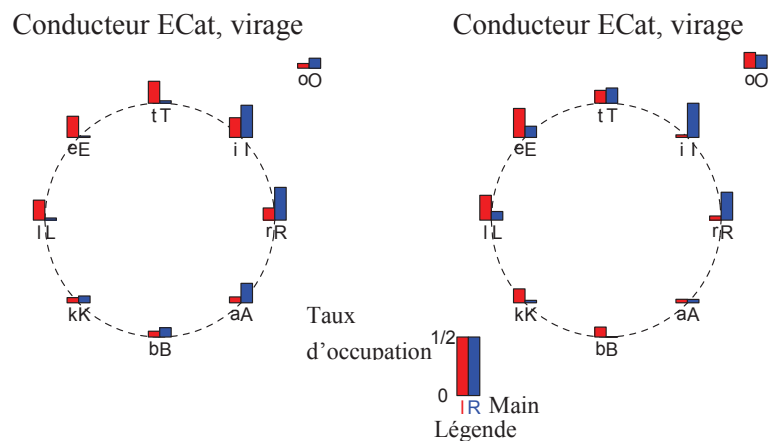


**Fig. 88 : Représentation graphique du taux d’occupation des modalités du volant pour 2 conducteurs et sur la moyenne des virages. Les histogrammes rouges représentent le taux d’occupation moyen de la modalité (lettre en minuscule) pour la main gauche et les histogrammes bleus représentent le taux d’occupation de la modalité (lettre en majuscule) pour la main droite, sur l’ensemble des virages. Les histogrammes dessinés hors du cercle correspondent à la modalité « main hors du volant ».**

L’axe 2 montre que certains sujets sont plus sensibles au facteur virage *j* (i.e. fort étalement du nuage de points sur l’axe 2). Les modalités discriminantes de l’axe 2 sont les variables du quart haut droit *i* et *r* (côté positif de l’axe) et du quart haut gauche *E* et *T* (côté négatif). Par exemple, les résultats de l’AFCM du conducteur ECat opposent les virages 2, 5 et 4, 6 respectivement, dans la partie haute et dans la partie basse de l’axe 2. La Fig. 89 montre un exemple des différences entre les poses de mains dans le virage  $j=2$  et le virage  $j=6$ , pour le conducteur ECat :

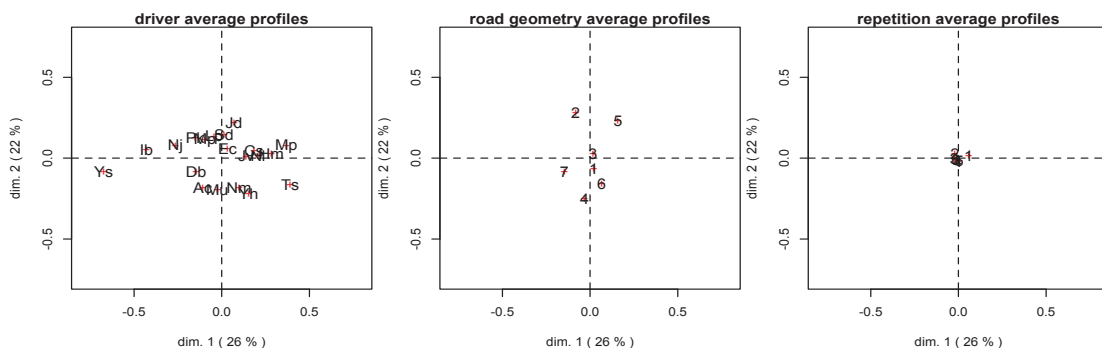
- dans le virage  $j=2$  la main gauche sollicite la partie droite (zones *i* et *r*) du volant et la main droite reste à droite.
- pour le virage  $j=6$ , le phénomène est inversé : la main droite sollicite la partie gauche (zones *E* et *T*) et la main gauche reste à gauche du volant.

Les données brutes mettent également en avant ce phénomène (Annexe 3).



**Fig. 89 : Représentation graphique du taux d'occupation moyen des modalités du volant pour le conducteur ECat dans les virages 2 et 6.**

La Fig. 90 montre de gauche à droite, la dispersion des nuages de points : des conducteurs (moyennée sur  $j, k$ ), des virages (moyennée sur  $i, j$ ) et des répétitions (moyennée sur  $i, k$ ). Les résultats montrent que les différences inter individuelles sont en moyenne, plus grandes que les différences intra individuelles. Elle montre également que la stratégie de chaque sujet est répétable dans la pose des mains pour un virage  $j$  donné.



**Fig. 90 : A gauche projection du profil moyen des 20 conducteurs (I=20), au centre projection des 7 virages (J=7) et à droite projection des 6 répétitions (K=6).**

Les différences inter individuelles sont expliquées par le fait que chaque conducteur construit sa propre stratégie de tourner le volant, à partir de bases communes enseignées à l’auto-école. Les schémas de conduite, décrits par Bellet (1998), diffèrent d’un conducteur à l’autre.

Les différences intra individuelles sont dépendantes du conducteur :

- Soit le sujet est répétable quelque soit le virage. L’étalement du nuage de points dans le plan factoriel est réduit (e.g. YSag annexe 1)

- Soit le sujet n'est pas répétable quelque soit le virage. Le nuage de points est étalé. (e.g. ECat annexe 1)

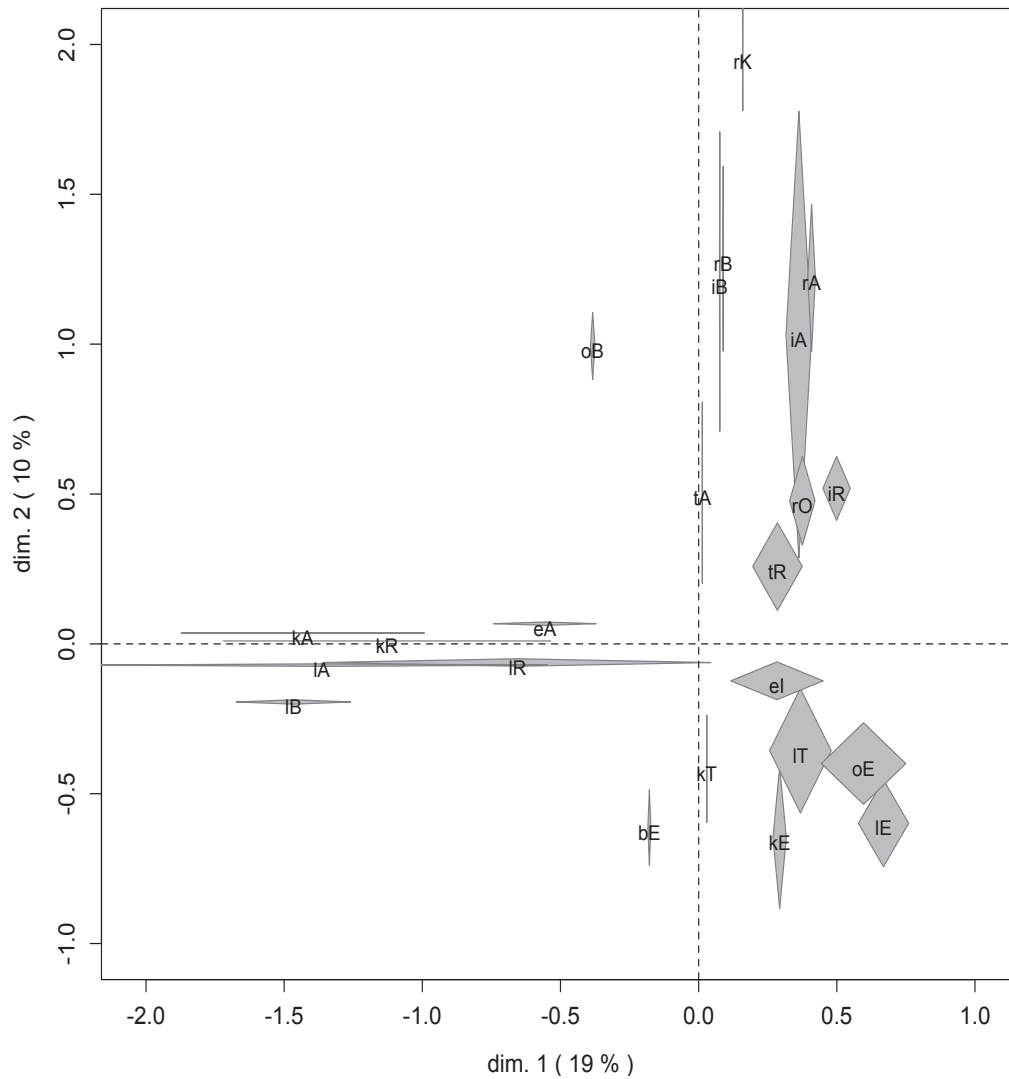
Les sujets sensibles au facteur virage  $j$  modifient la pose des mains en fonction du sens de rotation du virage : la main droite est plus à gauche quand le virage est à gauche et inversement pour la main gauche. Cela dépend du niveau d'automatisation et de prise de conscience des stratégies de conduite mise en place par les conducteurs (Michon, 1985). La mise en évidence de zones du volant discriminantes suggère que les conducteurs adoptent des stratégies de pose de mains différentes. L'analyse avec interaction des deux dans la partie suivante met en évidence ces stratégies.

- Avec interaction des 2 mains.

Cette étude s'intéresse au tableau des valeurs d'appartenance de la position angulaire des mains, comportant 840 lignes (20x7x6) et 81 colonnes (9x9). Elle vise à mettre en avant les relations fortes entre les deux mains, *i.e.* les relations privilégiées. Elle montre également les différences intra et inter sujets au niveau des interactions mains droite et gauche.

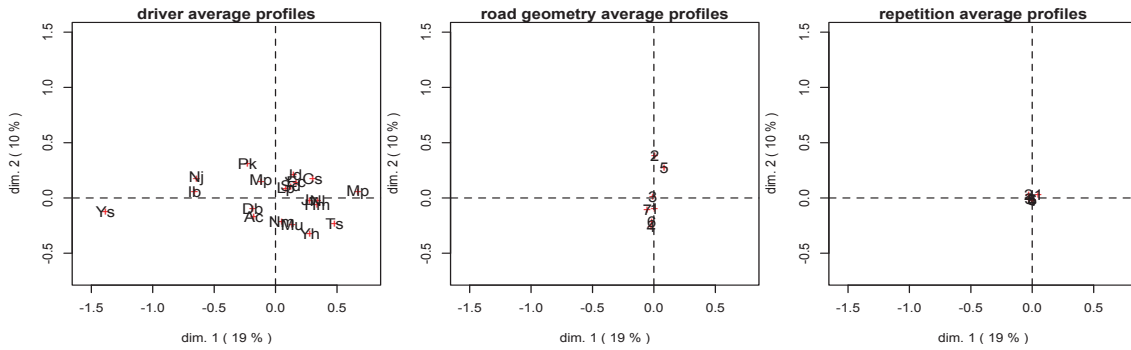
Le premier plan factoriel (axe horizontal) représente 19% de l'inertie totale et 10% pour le deuxième axe (Fig. 91). Dans cette étude, seul l'axe 1 est considéré. Il oppose les coordinations mains hautes sur le Volant **eI** (10h et 2h) ou **oE** (main droite à 10h) situées à droite de l'axe aux coordinations mains basses **IA, IR**, (main gauche à 9h et main droite entre 3 et 5h) **kR et kA** (main gauche dans la modalité entre 6 et 7h et main droite dans la modalité entre 4 et 5h), à gauche de l'axe.





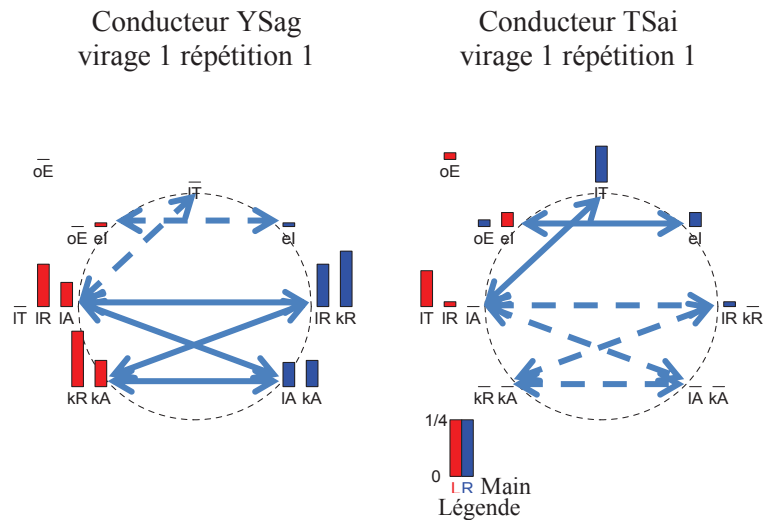
**Fig. 91 : AFCM avec interaction droite/gauche pour les 9x9 modalités. Lorsque le grand axe du losange est parallèle à l'axe 1 alors la variable est discriminante. Le grand axe du losange correspond à la contribution de la modalité par rapport à l'axe du plan factoriel avec lequel il est parallèle.**

L'étude de la position des mains avec interaction droite/gauche met en évidence des différences inter sujets plus grandes que les différences entre les virages et les répétitions, comme dans l'étude précédente (Fig. 92).



**Fig. 92 :** A gauche projection du profil moyen des 20 conducteurs (I=20), au centre projection des 7 virages (J=7) et à droite projection des 6 répétitions (K=6).

Les sujets précédemment cités (YSag et TSai) sont également opposés sur l’axe 1 dans cette étude (Annexe 4). Pour le sujet YSag les positions privilégiées se situent dans la moitié basse du volant alors qu’elles se situent plutôt dans la moitié haute pour TSai. Ces différences traduisent des stratégies différentes de tourner le volant. En ayant les mains dans la moitié basse du volant YSag ne croiserait pas souvent les mains pour tourner le volant contrairement à TSai. Ces résultats confirment les profils de conducteurs sains trouvés par Schiro, Gabrielli et al. (2012 (b)) à l’aide d’une représentation graphique sous forme de densitogramme et d’un indicateur numérique : les croiseurs et croiseurs asymétriques pourraient être inclus dans la catégorie des conducteurs sollicitant la partie haute du volant et les non croiseurs sont les conducteurs qui sollicitent la partie basse du volant (cf. §2). La Fig. 93 présente ces relations dominantes main droite/main gauche pour ces 2 conducteurs et pour le virage 1 (cf. chap. 2 : Tableau 9) dans sa première répétition. De la même manière, le profil croiseur est retrouvé.



**Fig. 93 :** Représentation graphique des interactions main droite/main gauche. Les flèches pleines sont les relations principales, les flèches en pointillés sont les relations peu utilisées.

### 3.6. Conclusion

Cette partie a mis en évidence les zones du volant discriminantes et les différences inter et intra sujets au travers l'étude de la pose de mains sur le volant. La méthode originale utilisée s'appuie sur un découpage flou du volant et une AFCM. L'avantage du découpage flou est de ne pas avoir de coupure franche entre les zones pour comparer les poses de main étant « à peu près » au même endroit d'un virage à l'autre. Le jeu de variables à analyser étant important (position des mains dans les 8 zones du volant + 1 modalité « main levée ») et les données étant hétérogènes, l'AFCM a été choisie pour mettre en évidence les variables discriminantes et les relations entre elles. Les résultats des études sans et avec interaction des deux mains montrent que les différences inter sujet sont plus grandes que les différences intra. Pour les études sans interaction des deux mains, les zones du volant qui permettent de différencier les conducteurs sont les modalités *A*, *R* et *k*, c.-à-d. respectivement le quart bas droit, la position à 3h pour la main droite et le quart bas gauche pour la main gauche. Certains sujets sont plus sensibles au virage (e.g. ECat) et sollicitent des zones du volant différentes selon le virage. Pour ces sujets, pour un virage à gauche, la main droite est plus à gauche et la main gauche reste à gauche du volant. La procédure s'inverse pour un virage à droite. Les résultats de l'étude de l'interaction main des deux mains met en évidence 2 profils : les conducteurs qui sollicitent la partie haute du volant et ceux qui sollicitent la partie basse. Ces deux profils sont à rapprocher respectivement des profils croiseurs/croiseurs asymétriques et non croiseurs trouvés dans la première partie de l'analyse.

## 4. Conclusion

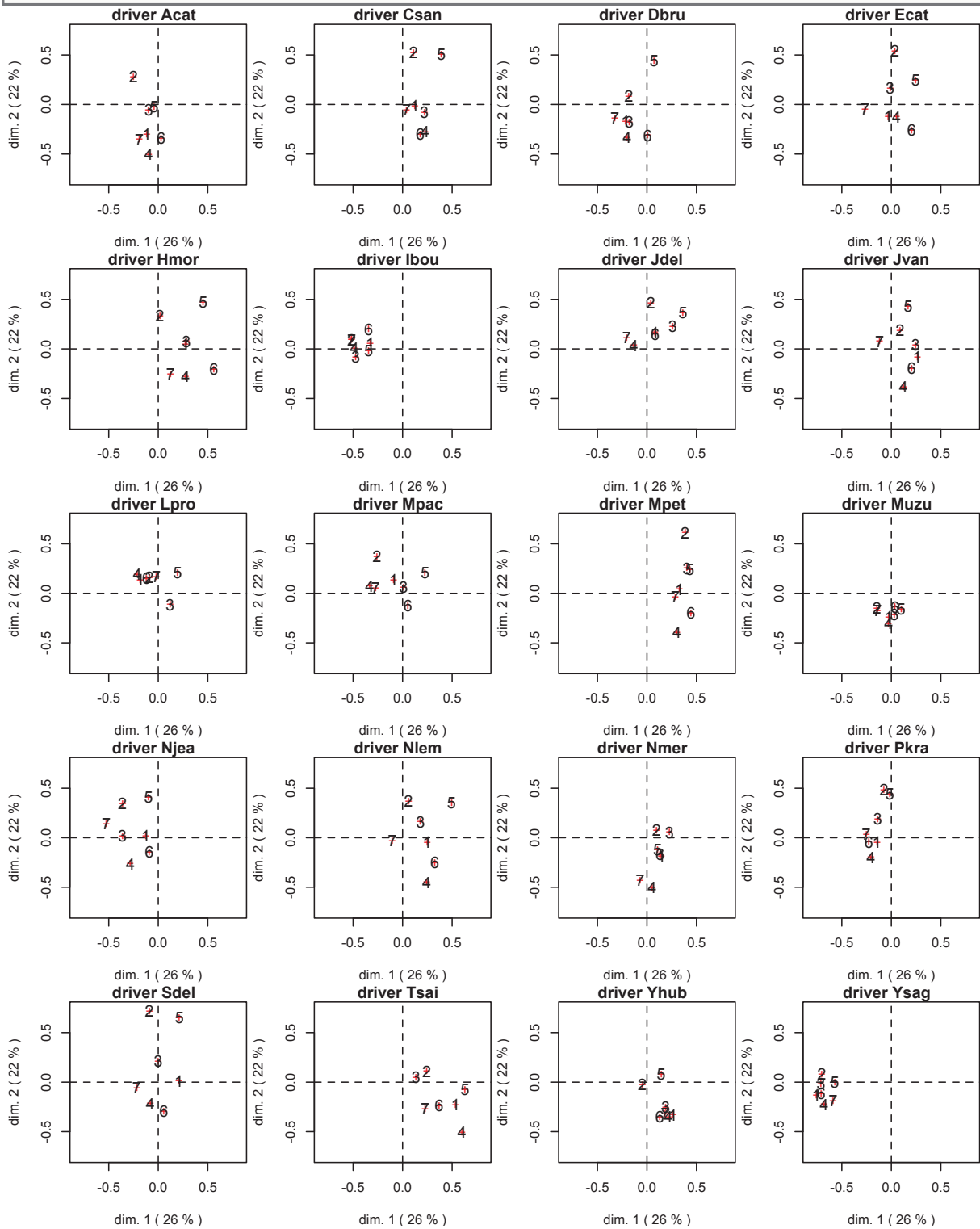
Ce chapitre a présenté les méthodes et les résultats de l'analyse de l'interaction cinématique main/volant. Cette étude a été réalisée en deux étapes, pour mettre en évidence, dans un premier temps, les différents profils de mouvement des mains utilisées dans une situation de manœuvres à basse vitesse et dans un second temps, pour observer la répétabilité inter et intra des conducteurs dans un geste de tourner le volant :

- une analyse spatiale du mouvement des mains sur le volant à partir des coordonnées des mains dans le plan du volant (lorsque les mains sont sur le volant) pour mettre en évidence différents profils de mouvements de main. Cette analyse a été réalisée à l'aide de densitogramme pour avoir un support visuel facilement interprétable du mouvement des mains. L'indice numérique  $I_n$  est calculé en fonction du pourcentage de temps que chacune des mains passe du côté opposé au volant. Cette étude a mis en évidence trois profils fonctionnels représentatifs du public de conducteurs sains : les conducteurs croiseurs, non croiseurs et croiseurs asymétriques. Le profil croiseur est le profil dominant dans la population saine. Pour autant, cette étude limite la comparaison intra sujet car l'indice utilisé est un indice global qui ne met pas en évidence les différentes poses de mains.
- une analyse spatiale de la pose des mains grâce à un découpage flou du volant et une AFCM est réalisée afin de mettre en évidence la répétabilité intra et inter conducteurs. Pour cela, le volant a été découpé en 8 modalités. Une modalité a été rajoutée significative de la présence de la main sur le volant. La position angulaire des mains a été calculée. Pour analyser les

données, une analyse factorielle des correspondances multiples a été réalisée sur les valeurs d'appartenance des positions angulaires des mains droite et gauche moyennées par virage sur le temps. L'étude sans interaction des deux mains met en évidence deux principaux résultats : 1/ les modalités de la partie basse du volant ne sont pas utilisées par tous les conducteurs et 2/ certains conducteurs adaptent leur pose de mains au sens de rotation du virage. Ces résultats montrent qu'il y a des différences inter sujets. Les différences intra sujets, quant à elles, sont plus faibles : même si le conducteur est sensible au virage, la pose des mains dans la répétition d'un même virage reste quasi identique. Ces résultats laissent penser qu'il y a des stratégies différentes pour tourner le volant. L'étude de l'interaction des deux mains le confirme en opposant une interaction des mains soit dans la partie haute soit dans la partie basse du volant. Enfin, deux des trois profils précédemment cités sont présentés ici.

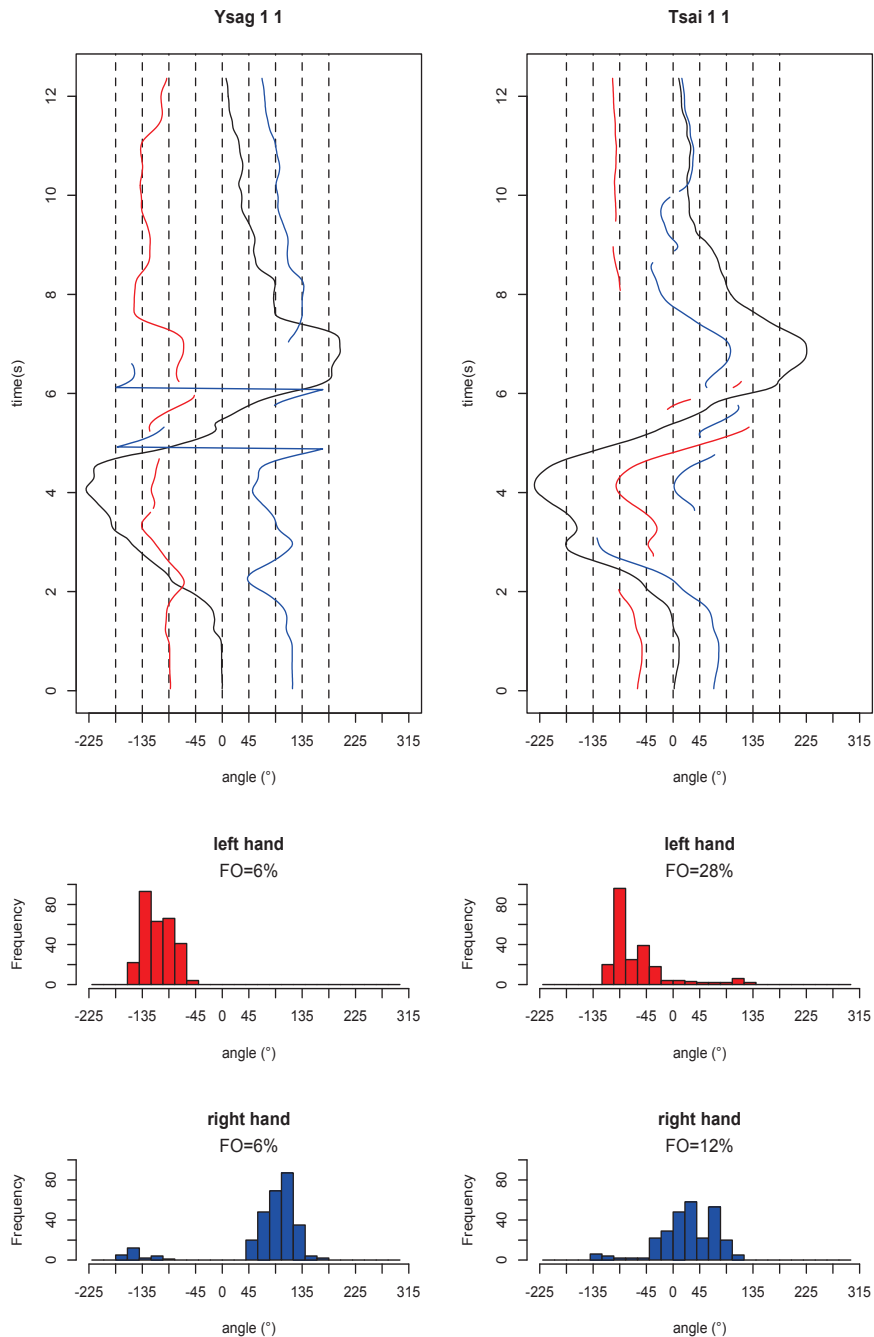
L'étude de l'interaction main/volant a mis en évidence différentes stratégies dans le placement des mains et une répétabilité certaine des conducteurs sains dans l'utilisation de ces stratégies. Cependant, le geste de tourner le volant ne peut se limiter à l'étude de l'interaction cinématique main/volant. Le chapitre suivant analyse différentes variables cinématiques et dynamiques dans l'optique d'identifier d'autres variables discriminantes.

**Annexe 1 : AFCM sur le tableau de données 840 lignes (20x7) et 18 colonnes (2x9)**



**Annexe 2** : Données initiales des positions angulaires de la main gauche en rouge et droite en bleu.

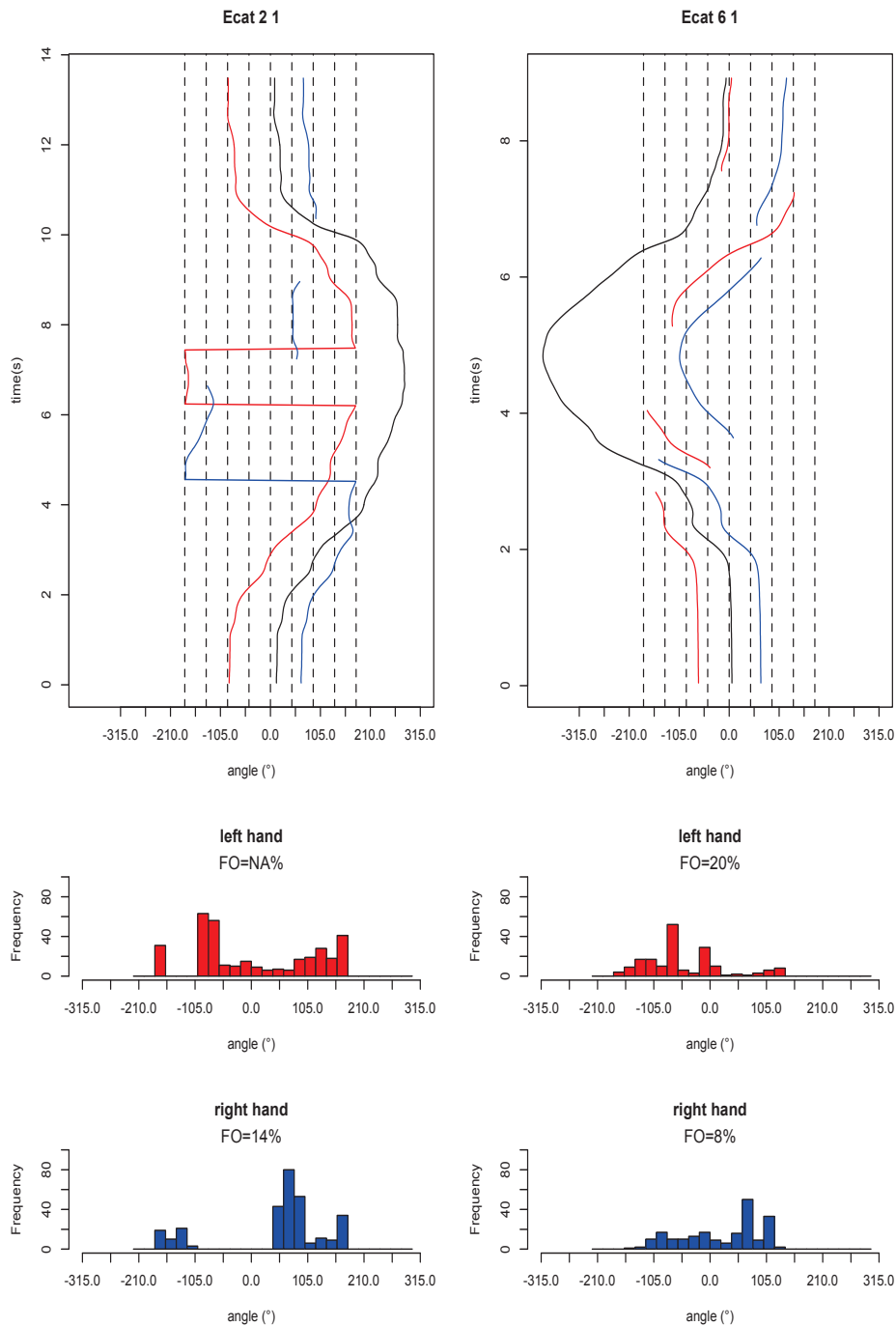
La Fig. 94 présente les données brutes des sujets Ysag et Tsai. La courbe noire est l'angle au volant demandé. Les histogrammes sous les courbes montrent que Ysag a la main gauche entre  $-45^\circ$  et  $-135^\circ$  et la main droite entre  $45^\circ$  et  $135^\circ$ , sur la totalité du virage. Pour TSai les courbes et les histogrammes montrent que la main droite (gauche) passe quelques fois à gauche (droite) du volant.



**Fig. 94** : Données brutes des sujets Ysag et Tsai dans la répétition 1 du virage 1.

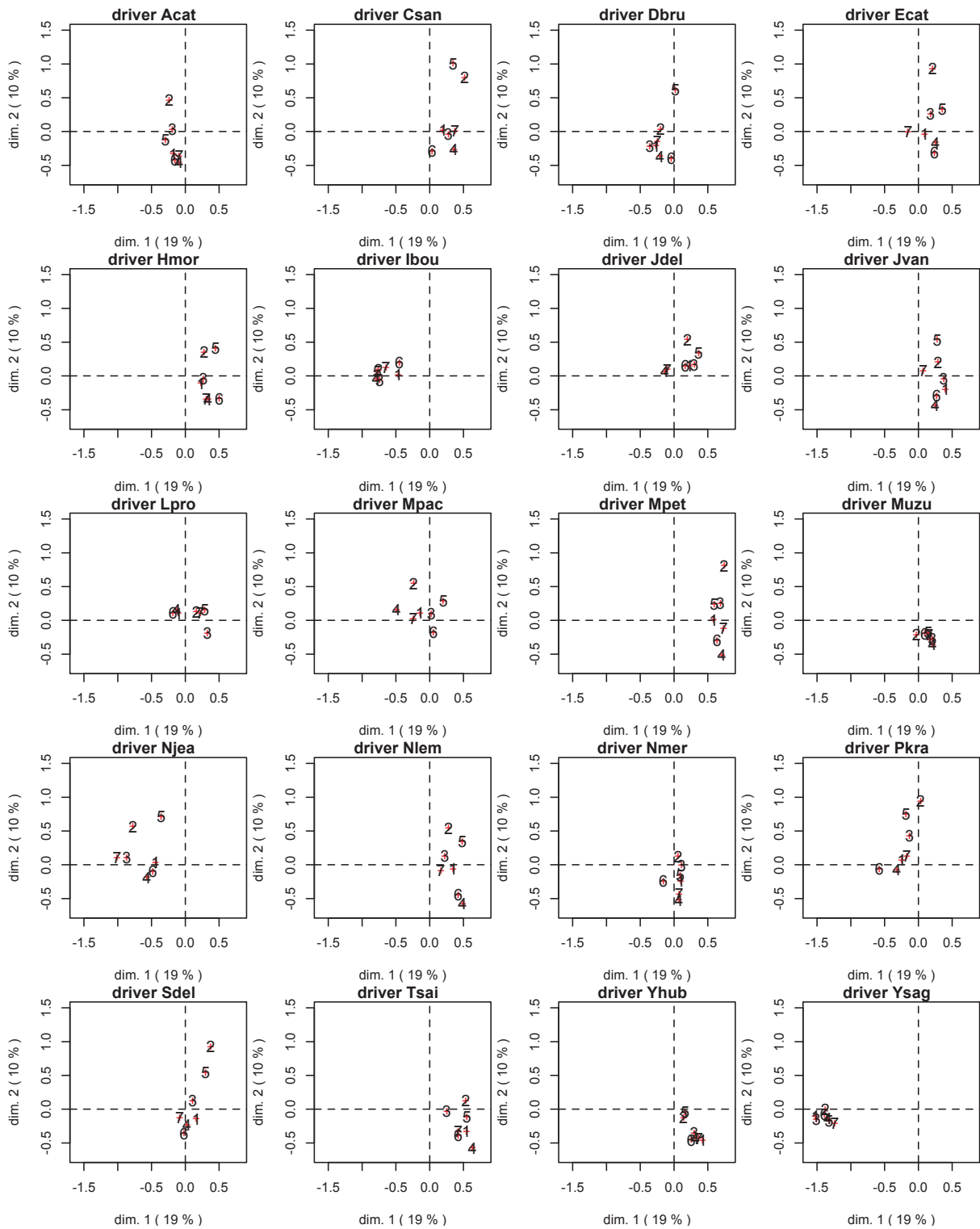
**Annexe 3 : Données initiales des positions angulaires des virages 2 et 6 du sujet Ecat.**

La Fig. 95 présente les données brutes du sujet Ecat pour le virage 2 et 6. Pour le virage 2, la main gauche (en rouge) ne décolle jamais du volant et la main droite (en bleu) est plus souvent à droite. Alors que pour le virage 6, la main gauche décolle du volant et la main droite utilise la moitié haute du volant (de  $-105^{\circ}$  à  $+105^{\circ}$ ).



**Fig. 95 : Données brutes du sujet Ecat dans les virages 2 (à gauche) et 6 (à droite)**

**Annexe 4 : AFCM sur le tableau de données 840 lignes (20x7) et 81 colonnes (9x9).**





---

## **CHAPITRE 4**

# **VARIABLES CINEMATIQUES ET DYNAMIQUES METHODE ET RESULTATS**

---

## 1. Introduction

Ce chapitre s'intéresse aux variables cinématiques et dynamiques décrivant le mouvement des membres supérieurs. L'objectif de ce chapitre est principalement d'identifier les variables pertinentes<sup>18</sup> du geste de tourner le volant. Dans cette optique, une base de données est créée. Elle regroupe :

- l'angle au volant réalisé, sa vitesse et son accélération
- la position angulaire des mains sur le volant, les angles articulaires, leurs vitesses et accélérations, les efforts appliqués sur le volant et les efforts interarticulaires. Ces variables sont calculées pour chaque membre supérieur (droit et gauche), chaque articulation (poignet, coude, épaule) et dans les 3 dimensions de l'espace.

Dans une première partie, ce chapitre présente la base de données construite. Dans une deuxième partie la méthode d'analyse par AFCM et les résultats découlant de celle-ci sont présentés.

## 2. Création de la base de données

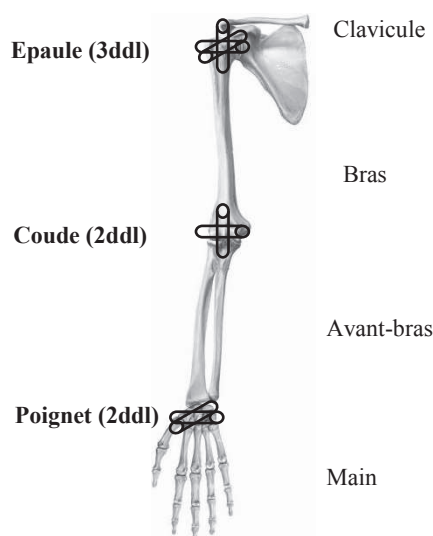
Le calcul des angles articulaires, des efforts au volant développés par chaque main et des efforts interarticulaires sont présentés ci-après. Nous renvoyons le lecteur au chapitre 3 § 3.3 pour le calcul de la position angulaire des mains sur le volant. La vitesse et l'accélération angulaires des articulations du membre supérieur sont données respectivement par la dérivée et la dérivée seconde des angles articulaires. La modèle cinématique et la table anthropométrique retenu pour ces calculs est également présenté.

### 2.1. Modélisation cinématique du membre supérieur

Le modèle cinématique du membre supérieur proposé par Chèze, 1996, et repris par Roux (2002), est retenu dans cette étude (Fig. 96).

---

<sup>18</sup> Qui permettent de mieux comprendre le geste de tourner le volant



**Fig. 96: Modélisation cinématique du membre supérieur du conducteur.**

Ce modèle se compose de 4 segments rigides (la clavicule, le bras, l'avant-bras et la main) et de 3 articulations (le poignet, le coude et l'épaule). L'orientation des segments est définie comme présentée au chapitre 2 § 3.2.2 afin de respecter au mieux les recommandations de l'ISB (Wu et al., 1995). L'épaule est assimilée à l'articulation clavico-humérale et est modélisée par une liaison sphérique à 3 ddl. Le coude et le poignet sont modélisés par 2 ddl en rotation : la flexion/extension et la prono/supination pour le coude et la flexion/extension et l'abduction/adduction pour le poignet

## **2.2. Angles articulaires**

### **2.2.1. Procédure de calcul**

Le calcul des angles articulaires est basé sur l'hypothèse que chaque segment de la chaîne articulaire du membre supérieur est un corps rigide indéformable. Ce calcul est réalisé en trois étapes :

1/ *Création des repères segmentaires* : cette étape est décrite au chapitre 2 § 3.2.2. Les vecteurs de base du repère segmentaire exprimés dans le repère Vicon sont stockés dans une matrice 3\*3 (P).

2/ *Calcul de la matrice de rotation* : chaque segment possède un repère permettant de connaître son orientation dans le repère Vicon. La matrice de rotation (R) entre 2 segments consécutifs est obtenue par le produit de la matrice de passage du segment proximal et de la transposée de la matrice du segment distal (eq. 4.1). La matrice de rotation permet d'exprimer l'orientation du segment distal par rapport au segment proximal.

3/ *Application de la séquence de rotation choisie* : les matrices de rotation R permettent d'obtenir les angles de trois rotations successives entre deux segments consécutifs (eq. 4.2). Pour cela, une séquence de rotation dont le choix affecte les valeurs des angles obtenus est retenue (Senk and Cheze 2006). Le Tableau 21 récapitule les séquences utilisées selon les recommandations de l'ISB (Wu, van der Helm et al. 2005).

**Tableau 21: Séquence de rotations pour le calcul des angles.**

Segments	Séquence	Rotation
Bras	Z-X-Y	e1 : Flexion (+) / Extension (-) e2 : Abduction (+) / Adduction (-) e3 : Rotation axiale médiale (+) / latérale (-)
Avant-bras	Z-X-Y	e1 : Flexion (+) / Hyper-extension (-) e2 : « Carrying Angle », interne (+) / externe (-) e3 : Pronation (+) / supination (-)
Main	Z-X-Y	e1 : Flexion (+) / Extension (-) e2 : Abduction (+) / Adduction (-) e3 : Rotation axiale de la main

D'un point de vue matriciel, soit  ${}^{vic}_bP$  la matrice de passage du bras dans le repère Vicon. Soit  ${}^{vic}_{av}P$  la matrice de passage de l'avant-bras dans le repère Vicon. L'équation 4.1 permet de calculer la matrice de rotation  ${}^b_{av}R$  entre le bras et l'avant bras (la création des repères locaux présentée chapitre 2)

$${}^b_{av}R = ({}^{vic}_bP)^{-1} \times {}^{vic}_{av}P \quad (4.1)$$

Selon la séquence d'Euler

$${}^b_{av}R = R_1 \times R_2 \times R_3 \quad (4.2)$$

En utilisant les propriétés des matrices de rotation 3x3, il est possible de définir la séquence des rotations entre le bras et l'avant-bras avec :

$R_1$  : Matrice représentant la rotation autour de Z de  $\alpha$  rad.

$R_2$  : Matrice représentant la rotation autour de X de  $\beta$  rad.

$R_3$  : Matrice représentant la rotation autour de Y de  $\gamma$  rad.

Autrement dit, l'équation 4.2 s'écrit :

$${}^b_{av}R = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta) & -\sin(\beta) \\ 0 & \sin(\beta) & \cos(\beta) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\times \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & 0 & \sin(\gamma) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\gamma) & 0 & \cos(\gamma) \end{bmatrix}$$

Soit :

$${}^b_{av}R = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \times \cos(\gamma) - \sin(\alpha) \times \sin(\beta) \times \sin(\gamma) & -\sin(\alpha) \times \cos(\beta) & \cos(\alpha) \times \sin(\gamma) + \sin(\beta) \times \sin(\beta) \\ \sin(\alpha) \times \cos(\gamma) + \cos(\alpha) \times \sin(\beta) \times \sin(\gamma) & \cos(\alpha) \times \cos(\beta) & \sin(\alpha) \times \sin(\gamma) - \cos(\alpha) \times \sin(\beta) \\ -\sin(\gamma) \times \cos(\beta) & \sin(\beta) & \cos(\beta) \times \cos(\gamma) \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

D'où, dans l'intervalle  $[-\pi; \pi]$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{-({}^b_{av}R)_{1,2}}{({}^b_{av}R)_{2,2}}\right) \quad (4.5)$$

$$\gamma = \arctan\left(\frac{-({}^b_{av}R)_{3,1}}{({}^b_{av}R)_{3,3}}\right) \quad (4.6)$$

$$\beta = \arcsin\left(({}^b_{av}R)_{3,2}\right) \quad (4.7)$$

Les angles articulaires retenus pour décrire le geste de tourner le volant sont (annexe 1) :

- Pour l'épaule : flexion/extension, adduction/abduction, rotation médiale
- Pour le coude : flexion et prono / supination
- Pour le poignet : flexion / extension et abduction / adduction

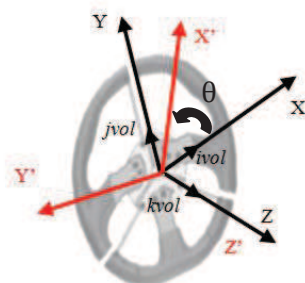
### 2.3. Efforts développés par chaque main sur le volant

Les efforts développés par chaque main sur le volant sont exploités directement pour l'analyse ou indirectement en tant que données d'entrée dans le calcul des efforts interarticulaires. Ce paragraphe détaille le calcul des efforts (forces et moments) des mains sur le volant directement utilisés pour l'analyse. L'autre cas est présenté au §2.4.3.

Les efforts exprimés au centre du volant dans le repère lié au volant sont calculés au point d'application (main). Ce calcul est réalisé en 2 étapes :

Etape 1 : Calcul des torseurs dans le repère volant fixe  $v_0$

Les dynamomètres du volant mesurent 3 forces et 3 moments. Les capteurs sont calibrés pour donner les forces et moment au centre du volant, et ces données sont exprimées dans les axes du repère volant tournant, puisque les capteurs tournent avec le volant (Fig. 97). Afin de gagner en lisibilité, la première étape est de calculer les forces et moments selon les axes du repère volant fixe,  $v_0$ .



**Fig. 97: Repère volant  $v_0$  à  $t=0$  (en noir) et repère volant  $v_\theta$  (en rouge) après une rotation d'angle  $\theta$  du volant autour de l'axe Z.**

Soit  $O_{vol}$  le centre du volant, de coordonnées dans le repère Vicon  $\begin{bmatrix} O_{vol_x} \\ O_{vol_y} \\ O_{vol_z} \end{bmatrix}_{vic}$  et  $\theta$  l'angle de rotation

du volant à l'instant  $t$ . Soit  ${}^{v_0}P_{v_\theta}$  la matrice de passage entre le repère volant  $v_0$  fixe et le repère volant tournant d'un angle  $\theta$  :

$${}^{v_0}P_{v_\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Il est alors possible d'exprimer les vecteurs force et moment dans le repère volant fixe :

$$\left( F_{mainVol/O_{vol}} \right)_{v_0} = {}^{v_0}P_{v_\theta} \times \left( F_{mainVol/O_{vol}} \right)_{v_\theta} \quad (4.2)$$

$$\left( M_{mainVol/O_{vol}} \right)_{v_0} = {}^{v_0}P_{v_\theta} \times \left( M_{mainVol/O_{vol}} \right)_{v_\theta} \quad (4.3)$$

Avec  $\left( F_{mainVol/O_{vol}} \right)_{v_0}$  la force appliquée par la main sur le volant dans le repère fixe  $v_0$ ,  $\left( F_{mainVol/O_{vol}} \right)_{v_\theta}$  la force appliquée par la main sur le volant dans le repère tournant  $v_\theta$ ,  $\left( M_{mainVol/O_{vol}} \right)_{v_0}$  le moment appliqué par la main sur le volant calculé au centre du volant dans le repère fixe  $v_0$ ,  $\left( M_{mainVol/O_{vol}} \right)_{v_\theta}$  le moment appliqué par la main sur le volant calculé au centre du volant dans le repère tournant  $v_\theta$ , et  ${}^{v_0}P_{v_\theta}$  matrice de passage entre le repère volant fixe et le repère volant tournant.

Etape 2 : application du torseur à un point d'application

Soit A le point de contact de la main sur le volant. Ce point n'étant pas disponible directement, sa position est estimée de la façon suivante : le point de contact est assimilé au centre du segment formé par le marqueur du métacarpe M2 et du marqueur du métacarpe M5, translaté de 20mm (épaisseur de

la main) selon l'axe X du repère anatomique de la main (cf. Chap. 2, §3.2.2). Cet axe X étant orthogonal au plan de la main et dirigé selon un axe postéro-antérieur, le point de contact A est situé au niveau de la paume de la main, entre les métacarpes M2 et M5.

En faisant l'approximation que le volant est indéformable il est possible de calculer les forces et moments en ce point :

$$(\mathbf{F}_{\text{mainVol/A}})_{\mathbf{v}_0} = (\mathbf{F}_{\text{mainVol/Ovol}})_{\mathbf{v}_0}$$

Et pour les moments :

$$(\mathbf{M}_{\text{mainVol/A}})_{\mathbf{v}_0} = (\mathbf{M}_{\text{mainVol/Ovol}})_{\mathbf{v}_0} + (\mathbf{AO}_{\text{vol}})_{\mathbf{v}_0} \wedge (\mathbf{F}_{\text{mainVol/Ovol}})_{\mathbf{v}_0}$$

## 2.4. Efforts interarticulaires

Les efforts interarticulaires sont les forces de réaction articulaires et les couples articulaires. La force de réaction articulaire est la somme de toutes les forces musculaires, tendineuses, de contact et de cisaillement s'exerçant en une articulation. Le couple articulaire est la somme de tous les moments des forces. Le centre articulaire est leur point d'application.

Le calcul des efforts interarticulaires relève d'un problème de dynamique inverse. Cette partie présente les hypothèses formulées, le calcul des efforts interarticulaires et les efforts interarticulaires chez les conducteurs, en 3D.

### 2.4.1. Hypothèses

Pour calculer les efforts interarticulaires à partir du PFD, des hypothèses simplificatrices sont formulées :

- les segments corporels peuvent être assimilés à des corps rigides indéformables (des solides) : la géométrie des segments corporels est donc invariante,
- chaque segment corporel possède une masse constante et un centre d'inertie invariant,
- le mouvement des masses molles (e.g. muscles, tissus adipeux, tissus conjonctifs et peau) est négligeable et n'affecte pas les propriétés inertielles des segments corporels : le modèle inertiel adopté, bien qu'approximatif de la réalité, est supposé valide quelque soit le mouvement réalisé,
- les frottements et les glissements entre les surfaces articulaires sont négligeables : les actions-réactions articulaires ont une intensité égale, mais de signes opposés.

Les hypothèses formulées permettent l'application des équations de Newton-Euler. Le paragraphe suivant rappelle les bases de la dynamique inverse et introduit les données nécessaires au calcul des efforts interarticulaires.

### 2.4.2. Calcul des efforts interarticulaires

Le calcul des efforts interarticulaires relève d'un problème de dynamique inverse. Il se résout grâce au Principe Fondamental de la Dynamique (PFD), issu de la deuxième loi de Newton. Les équations tiennent compte du théorème de la résultante de Newton décrit par l'équation 4.4 et du théorème du moment cinétique ou théorème d'Euler décrit par l'équation 4.5, pour chacun des  $n$  corps rigides constituant le système mécanique. En particulier, pour un solide  $S$ , de masse  $m_S$  et de centre de gravité  $G$ , d'accélération en  $G$   $\overrightarrow{a_{GS}}$  et de moment cinétique en  $G$   $\overrightarrow{\sigma_G}$ , les équations de Newton-Euler permettent d'écrire au centre de gravité de  $S$  :

$$\sum \overrightarrow{F_{ext/R_{vic}}} = m_S \cdot \overrightarrow{a_{GS}} \quad (4.4)$$

$$\sum \overrightarrow{M_{GF_{ext/R_{vic}}}} + \sum \overrightarrow{C_{G_{ext/R_{vic}}}} = \frac{d\overrightarrow{\sigma_G}}{dt} /_{R_{vic}} \quad (4.5)$$

avec  $R_{vic}$  le repère Vicon,  $\overrightarrow{F_{ext}}$  une force externe exercée sur  $S$ ,  $\overrightarrow{M_{GF_{ext}}}$  le moment en  $G$  de la force externe appliquée sur  $S$ ,  $\overrightarrow{C_{ext}}$  un couple appliqué sur  $S$ .

Ces équations sont généralement utilisées dans le cadre de l'analyse du mouvement car elles donnent directement accès aux efforts interarticulaires. Pour écrire ces équations, Bràt, Stejskal et al. (1979) recommandent le formalisme des matrices homogènes (T). Ce formalisme est adopté dans la présente thèse pour le calcul des efforts interarticulaires car ces matrices permettent d'écrire l'équilibre dynamique (théorème de Newton et d'Euler) en une seule équation. La matrice de rotation est complétée avec le vecteur colonne des coordonnées de l'origine du segment distal dans le repère proximal et avec la ligne (0 ; 0 ; 0 ; 1), on obtient une matrice 4\*4. Cette écriture est adoptée ici car elle est bien adaptée pour décrire la cinématique articulaire : elle permet de décrire à la fois la translation et la rotation des segments.

La méthode de calcul utilisée est la méthode itérative de dynamique inverse décrite par le formalisme des matrices homogènes (Legnani, Casolo et al. 1996). L'algorithme de calcul de dynamique inverse, utilisé dans cette présente thèse, est tiré de la thèse de Debril (2011 (a)). Les efforts interarticulaires sont calculés du segment distal (la main) au segment proximal (l'épaule), à partir du modèle présenté dans la partie suivante.



### 2.4.3. Efforts interarticulaires chez le conducteur en 3D

Dans cette thèse, les efforts interarticulaires sont calculés en 3D pour le conducteur au niveau des 2 poignets, 2 coudes et 2 épaules. Le modèle cinématique retenu à été présenté au §2.1.

Pour appliquer la méthode de calcul itérative, les efforts en bout de chaîne cinématique doivent être connus. Les efforts appliqués par les mains sur le volant sont calculés dans le repère de référence Vicon comme toutes les données cinématiques. Pour cela, l'étape 1 du calcul des efforts dans le repère volant fixe ( $R_{v0}$ ) est repris (cf. étape 1, §2.3). La deuxième étape consiste ici à exprimer les efforts des mains dans le repère Vicon.

Soit  ${}^{vic}P_{v0}$  la matrice de passage entre le repère volant fixe  $v_0$  et le repère Vicon (de centre  $O_{vic}$ ). Les forces et les moments appliqués par la main sur le volant sont calculés selon les axes du repère Vicon :

$$\left(F_{\text{mainVol}/O_{\text{vol}}}\right)_{vic} = {}^{vic}P_{v0} \times \left(F_{\text{mainVol}/O_{\text{vol}}}\right)_{v0} \quad (4.6)$$

$$\left(M_{\text{mainVol}/O_{\text{vol}}}\right)_{vic} = {}^{vic}P_{v0} \times \left(M_{\text{mainVol}/O_{\text{vol}}}\right)_{v0} \quad (4.7)$$

On calcule alors les efforts et moments au point d'application A de façon similaire au §2.1 :

$$\left(F_{\text{mainVol}/A}\right)_{vic} = \left(F_{\text{mainVol}/O_{\text{vol}}}\right)_{vic} \quad (4.8)$$

Et pour les moments :

$$\left(M_{\text{mainVol}/A}\right)_{vic} = \left(M_{\text{mainVol}/O_{\text{vol}}}\right)_{vic} + (AO_{\text{vol}})_{vic} \wedge \left(F_{\text{mainVol}/O_{\text{vol}}}\right)_{vic} \quad (4.9)$$

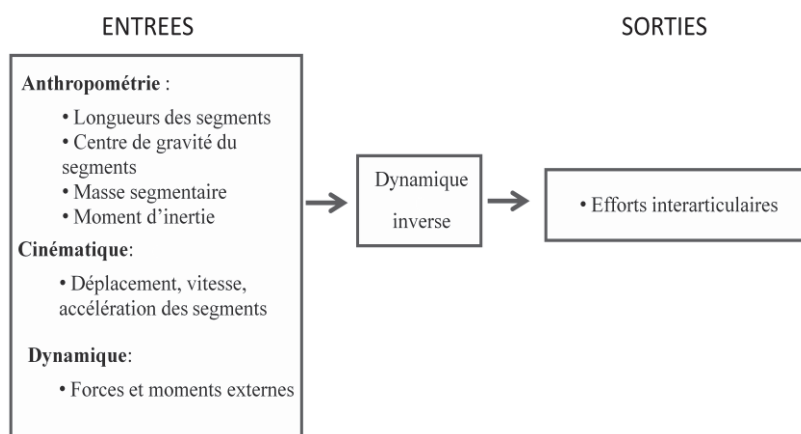
Enfin, le calcul des forces et des moments définis par le PFD, nécessite de déterminer les propriétés massiques, inertielles et géométriques des segments corporels étudiés. A chaque partie du corps est associé la masse, la position du centre de gravité par rapport aux deux extrémités du segment et une matrice d'inertie. Les tables anthropométriques de De Leva (1996) ont été choisies pour renseigner ces informations car elles proposent un modèle cohérent adapté à la mobilité des segments en découpant les membres aux centres articulaires. Le Tableau 22 présente la table anthropométrique définie par De Leva pour les membres supérieurs. Ces données sont regroupées pour chaque segment S dans la matrice de pseudo-inertie du segment, utilisé dans l'algorithme de Debril (2011).

**Tableau 22 : Table anthropométrique définie par De Leva (1996).**

Segments	Extrémité		Masse (%)	Position du centre d'inertie sur l'axe longitudinal (%)	Axe d'inertie sagittal (%)	Axe d'inertie transverse (%)	Axe d'inertie longitudinal (%)
	Proximale	Distale					
Bras	Epaule	Coude	2.7	57.7	28.5	26.9	15.8
Avant-bras	Coude	Poignet	1.6	45.7	27.6	26.5	12.1
Main	Poignet	Bout des doigts	0.6	79	62.8	51.3	40.1

### 2.5. Conclusion

Cette partie a présenté le calcul des angles articulaires, des efforts au volant au point d'application de la main et le calcul des efforts interarticulaires. Les calculs des angles sont réalisés à partir des séquences d'Euler et des recommandations de l'ISB. Les efforts mesurés au centre du volant sont transposés au point d'application de la main sur le volant pour être directement exploités. Ils sont ensuite exprimés dans le repère Vicon pour réaliser le calcul de dynamique inverse. Grâce au volant V3B, la distinction main droite et main gauche est possible pour le calcul des efforts. Enfin, le calcul des efforts interarticulaires est réalisé selon le modèle cinématique du membre supérieur comportant 4 segments et 3 articulations, des propriétés anthropométriques du sujet, de la position des membres supérieurs et des efforts appliqués par les mains sur le volant. La méthode itérative du calcul de la dynamique inverse est utilisée. La Fig. 98 résume le calcul des efforts interarticulaires.



**Fig. 98: Schéma récapitulatif des données d'entrée et de sortie de la dynamique inverse.**

Au total, la base de données  $B_0$  compte 95 variables (Tableau 23). Elles sont étudiées par la suite pour les 6 répétitions de 7 virages composant un scénario et pour les 20 sujets sains. La partie suivante recherche les variables pertinentes du geste de tourner le volant.

**Tableau 23: Tableau récapitulatifs des variables étudiées.**

Variabiles	Nombre (nombre de variables*nombre de membres)	Unités
Accélération angle au volant	1	°/s <sup>2</sup>
Vitesse angle au volant	1	°/s
Angle au volant	1	°
Accélération angulaire du poignet	2*2	°/s <sup>2</sup>
Accélération angulaire du coude	2*2	°/s <sup>2</sup>
Accélération angulaire de l'épaule	3*2	°/s <sup>2</sup>
Vitesse angulaire du poignet	2*2	°/s
Vitesse angulaire du coude	2*2	°/s
Vitesse angulaire épaule	3*2	°/s
Angle du poignet	2*2	°
Angle du coude	2*2	°
Angle de l'épaule	3*2	°
Efforts au volant développés par les mains	6*2	N et N.m
Efforts interarticulaires au poignet	6*2	N et N.m
Efforts interarticulaires au coude	6*2	N et N.m
Efforts interarticulaires à l'épaule	6*2	N et N.m
Position angulaire des mains sur le volant	1*2	°
Total : 95		

### 3. Analyse de la base de données

#### 3.1. Introduction

L'objectif de cette partie est de mener une analyse multi variables du geste de tourner le volant. Dans ce cadre, une analyse factorielle des composantes multiples (AFCM) est choisie à nouveau pour mettre en relation les variables qualitatives (*i.e.* la main est ou n'est pas sur le volant) et/ou quantitatives (e.g. efforts) et différents facteurs comme le sujet, le virage ou la répétition. L'approche méthodologique de Loslever, Guerra et al. (1997), présentée au chapitre 3 §3.5, est reprise et appliquée à cette base de données (avec des échelles de mesure et ordres de grandeur différents). La conduite étant une tâche asymétrique, les données sont analysées aussi bien pour le membre supérieur droit que le gauche. La base de données de l'étude ( $B_0$ ) peut être vue comme un ensemble d'échantillons temporels multidimensionnels regroupant 95 variables temporelles dans  $S = I * J * K = 20 * 6 * 7 = 840$  situations empiriques (avec  $I$ , le nombre de sujet,  $J$ , le nombre de répétition et  $K$  le nombre de virages). Le nombre d'échantillons temporels varie d'un virage à l'autre : de 200 images à 477 images.

L'analyse de cette base de données complexe se déroule en 2 étapes : dans un premier temps, une analyse atemporelle à l'aide de fenêtres spatiales floues moyennées sur le temps est réalisée. L'objectif est de mettre en évidence les variables discriminantes. Ensuite, une analyse temporelle des 95 variables est réalisée. Son objectif est de comprendre l'évolution des variables discriminantes trouvées par cette analyse, plus particulièrement au cours d'un virage.

#### 3.2. Analyse atemporelle

L'analyse atemporelle des 95 variables est réalisée à partir d'une AFCM. La base de données à analyser contient  $S = I * J * K = 20 * 6 * 7 = 840$  situations empiriques, avec pour chacune des situations  $S$  des signaux multidimensionnels  $Y_{0ijk}$  contenant les 95 variables. Cette analyse a pour objectif de mettre en évidence les variables discriminantes, celles qui différencient les conducteurs pendant le geste de tourner le volant. Pour cela, les variables sont découpées en fenêtres floues et les valeurs d'appartenance des variables à chacune des modalités floues sont calculées. La procédure d'analyse en 5 étapes présentée au chapitre 3 § 3.5 est reprise. Dans cette partie, essentiellement l'étape 5 de « présentation des résultats » est exposée pour plus de clarté dans la lecture des résultats. Les étapes précédentes sont majoritairement renvoyées annexe 2 de ce chapitre.

Cette partie se compose de trois sections : la nomenclature des variables, la présentation du découpage flou et les résultats de l'analyse.

### 3.2.1. Nomenclature des variables

Pour uniformiser et simplifier le nom des variables, la nomenclature utilisée est :

- le premier symbole indique le lieu de la mesure, i.e. Elbow (E), Hand (H), Shoulder (S), Wrist (W) et steering wheel (O),
- le dernier symbole renseigne le membre concerné, i.e. Left (L) et Right (R),
- entre ces deux symboles, 3 types d'informations biomécaniques peuvent apparaître : une lettre pour caractériser les efforts, i.e. Force (F) et le Couple (T) ou la cinématique, i.e. abduction (a), flexion (f), pronation (p), etc..., un nombre pour renseigner le degré de dérivée des variables cinématique i.e. speed (1) et accélération (2) et enfin une minuscule pour indiquer l'axe étudié (x,y ou z).

Par exemple, HL pour la position angulaire de la main gauche HFzR pour la force exercée selon l'axe Z par la main droite sur le volant et EpL pour la pronation du coude gauche. Toutes les notations utilisées pour nommer les variables calculées sont fournies en annexe 3.

### 3.2.2. Découpage en fenêtres floues

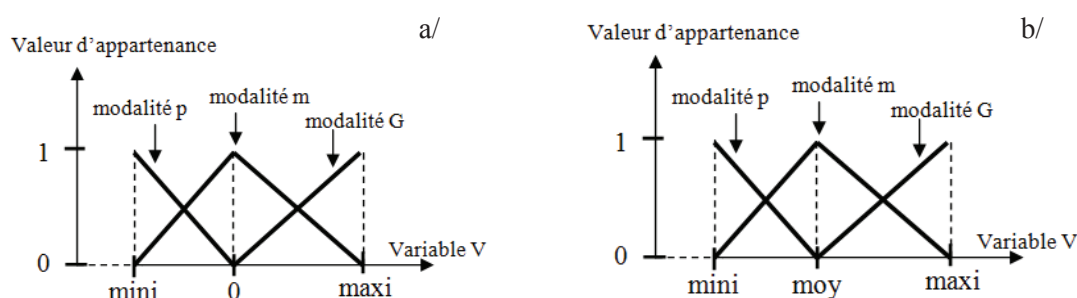
Le découpage de chaque variable  $v$  ( $v=1, \dots, v_f = V=95$ ) doit être adapté comme suit :

- le nombre de fenêtres floues est un compromis entre un nombre minimal de fenêtres qui entraîne une forte perte d'informations et un nombre maximal qui induit une analyse trop longue et complexe,
- si possible choisir le même nombre de fenêtres floues pour chaque variable pour mettre plus facilement en relation les variables,
- dans la plupart des cas, privilégier des fenêtres triangulaires pour caractériser la plage principale des données et des fenêtres trapézoïdales, moins précises, pour le reste des données extrémales.
- Les valeurs extrémales, positives ou négatives peuvent être entachées d'incertitudes. Elles ne doivent alors pas être considérées. En cas de présence de données anormalement trop petites ou trop grandes, la plage « effective » du signal se limite aux données où un certain pourcentage (représente environ 1% des données) a été enlevé à gauche et à droite de l'histogramme d'amplitude (cf. annexe 4).
- Si la plage de mesure d'une variable varie entre des valeurs négatives et positives, une fenêtre centrale est construite autour de zéro

Le nombre de variables étant important et l'analyse compliquée, le nombre de fenêtres spatiales est limitée à trois décrivant respectivement les notions de « petite » (p), « moyenne » (m) et « grande »

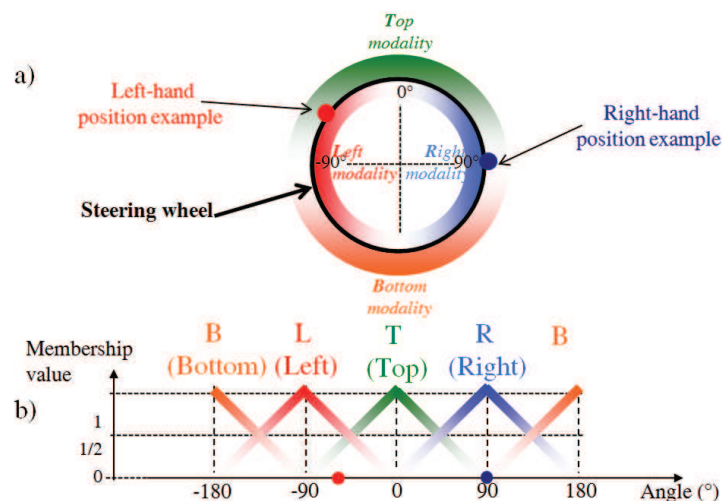
(G) valeurs, à partir des plages de mesures de chacune des 95 variables moyennées sur le temps (cf. annexe 4). Pour une meilleure lisibilité des graphiques les symboles « - », « = » et « + » sont associés respectivement aux fenêtres p, m et G. Les fonctions d'appartenance de ces fenêtres spatiales sont construites de deux façons différentes selon les variables concernées :

- Les variables qui évoluent de part et d'autre du zéro comme les variables de vitesse ou d'accélération par exemple, ont leur fenêtre intermédiaire placée de façon à ce que la valeur maximale d'appartenance soit en 0 (Fig. 99a).
- Les variables dont le signe reste constant comme pour certaines forces, ont la valeur maximale de la modalité intermédiaire associée à la moyenne arithmétique (Fig. 99b).



**Fig. 99 : Principe de découpage de la plage de variation d'un signal multidimensionnel, a/ cas d'une composante présentant des variations de part et d'autre du zéro b/ cas d'une composante restant toujours positive (ou négative) (Loslever and Bouilland 2003).**

Pour les variables de position angulaire des mains *HL* et *HR*, le découpage est différent. Elles regroupent des aspects quantitatifs (position angulaire de la main sur le volant) et des aspects qualitatifs (la main est ou n'est pas sur le volant) qu'il faut prendre en compte. Le volant est donc divisé en 4 modalités (Top, Bottom, Left et Right), plus une modalité « présence de la main sur le volant » (Fig. 100).



**Fig. 100 : a) Découpage du volant (la modalité « présence de la main sur le volant » n’est pas montrée mais elle est considérée) et b) exemple des positions des mains et des valeurs d’appartenance aux modalités.**

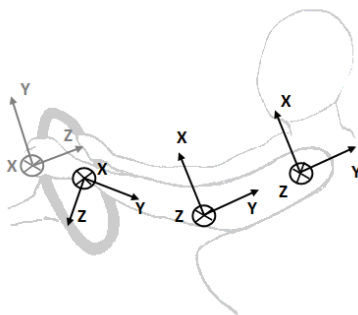
Un tableau des valeurs d’appartenance des variables aux fenêtres spatiales floues est créé. Au total, 93 variables ont été découpées en 3 fenêtres floues et 2 variables (i.e. position angulaire des mains) en 4 fenêtres floues. La procédure d’analyse et le plan factoriel est présenté annexe 2 Fig. 111. La section suivante présente les résultats obtenus pour l’AFCM des valeurs d’appartenance du tableau  $I^*J^*K$  lignes et  $93*3 + 2*4$  colonnes.

### 3.2.3. Résultats

#### - Variables discriminantes

L’axe 1 est représentatif de 28% de l’inertie totale des données. L’inertie des axes 2 et 3 est plus faible (respectivement, 13% et 6%). Les phénomènes traduits par ces deux axes sont donc moins marqués et discriminent moins les sujets. Seules les variables de l’axe 1 sont étudiées par la suite.

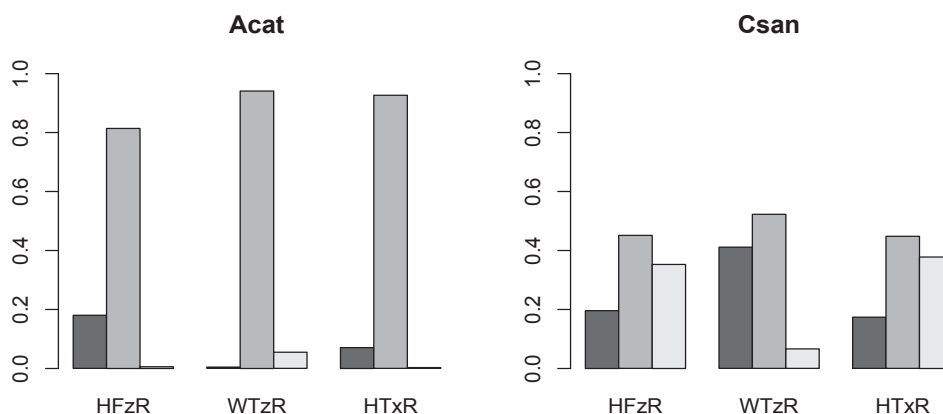
Les variables discriminantes sont des variables d’efforts et plus particulièrement la force normale positive exercée par la main droite sur le volant ( $HFzR+$ ), le moment positif exercé autour de X par la main droite sur le volant ( $HTxR+$ ) et le moment articulaire en Z du poignet correspondant au moment produit lors de sa flexion/extension ( $WTzR-$ ). La combinaison des moments articulaires dans le poignet autour de Z ( $WTzR-$ ) et du moment appliqué par la main sur le volant autour de X ( $HTxR+$ ) traduit le fait que le conducteur a tendance à tirer sur le volant selon l’axe Z (présence de la modalité  $HFzR+$ ) (Fig. 101). Au regard du plan factoriel de l’AFCM (annexe 2, Fig. 111), seuls deux sujets Csan et Mpet, à droite de l’axe 1, ont ce comportement. Sinon, la grande majorité de la population pousse le volant.



**Fig. 101 : Orientation des repères utilisés.**

La Fig. 102 montre un exemple les valeurs d'appartenance moyennes des variables discriminantes de l'axe 1 pour 2 sujets opposés sur cet axe (lors de l'analyse en annexe 2 sur le tableau Y2 (Fig. 110), Acat est à gauche de l'axe et Csan à droite). Pour les sujets à gauche de l'axe 1, comme pour Acat, la modalité « m » (i.e. modalité moyenne) est fortement sollicitée contrairement à Csan où les valeurs d'appartenance sont réparties dans les 3 modalités. Csan placé à droite de l'axe 1 affiche des valeurs de *HFzR+*, *WTzR-* et *HTxR+* plus importante que Acat situé à gauche de l'axe 1. Autrement dit, 2 profils peuvent être définis selon ces variables :

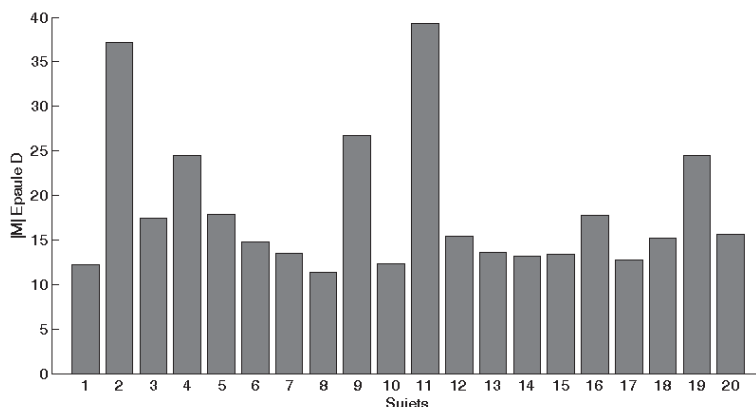
- Le profil pousseur moyen (e.g. Acat) : ces conducteurs ont tendance à mettre peu d'efforts normaux sur le volant (la modalité « m » est fortement sollicitée) et les efforts appliqués sont des efforts de pousser. C'est le profil dominant de notre population expérimentale (90% des sujets, soit 18 sujets).
- Le profil tireur (e.g. Csan) : ces conducteurs tirent fortement sur le volant (la modalité « G » est sollicitée)



**Fig. 102 : Histogramme représentant la sollicitation des modalités p/- (en noir), m/= (en gris foncé) et G/+ (en gris clair) pour 2 conducteurs fortement différenciés par l'AFCM.**



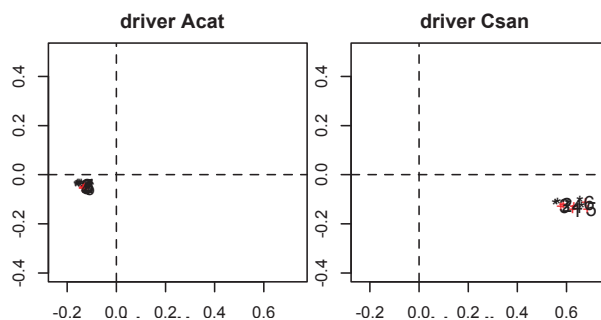
Contrairement à la force de préhension (Eksioglu and Kizilaslan 2008), le comportement de tirer/pousser n'est pas lié au sexe des conducteurs. Il dépend plutôt de la recherche d'un confort ergonomique de la position du bras sur le volant. Les conducteurs sains reposent leurs bras sur le volant, comme observé dans l'étude de Hault-Dubrulle, Robache et al. (2010). Cette action procure moins de fatigue et un plus grand confort que de maintenir son bras à l'horizontale. Comme le montre la Fig. 103, les couples articulaires à l'épaule les plus importants sont calculés pour les sujets 2 et 11, respectivement Csan et Mpet.



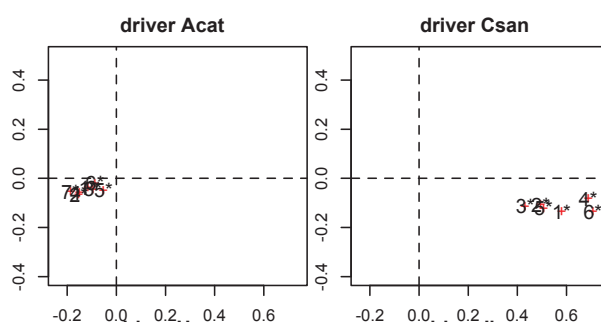
**Fig. 103 : Couple résultant moyen à l'épaule droite pour tous les sujets.**

- Différences intra et inter-sujets

Les différences intra et inter sujets peuvent être visualisées en considérant la notion de point-lignes mise en « supplémentaire » (cf. Chap.1, annexe 5) en moyennant le facteur  $k$  et en moyennant sur le facteur  $j$ . Dans les deux cas, les différences inter sujets sont plus grandes que les différences intra-sujets : la majorité des conducteurs sont à gauche de l'axe 1 avec un étalement des nuages de points faibles et d'autres à droite avec un étalement des nuages de points plus important (annexe 5). Dans ces analyses, seuls deux sujets sont situés à droite de l'axe 1. Les Fig. 104 et 12 montrent un exemple de 2 conducteurs opposés, Acat et Csan. L'étalement du nuage de point est plus important pour les conducteurs situé à droite de l'axe dans les deux figures (Les résultats pour tous les sujets sont présentés en annexe 5 pour l'analyse du tableau 20\*6 et en annexe 6 pour le tableau 20\*7).



**Fig. 104 : Résultats de l'AFM, pour les sujet ACat et CSan, sur le tableau 20\*6 (les lignes sont placées en « supplémentaires », cf. fig. 34 du Chap. 1 annexe 5).**



**Fig. 105 : Résultats de l'AFM, pour les sujets ACat et CSan, sur le tableau 20\*7 (les lignes sont placées en « supplémentaires », cf. fig. 34 du Chap. 1 annexe 5).**

Ceci montre que certains sujets (e.g. CSan) sont plus sensibles aux virages. Trois hypothèses peuvent être avancées, par rapport au stress généré par la tâche et à l'absence d'informations visuelles et vestibulaires dans le protocole utilisé :

1/Dans les tâches de tracking telle que la nôtre, pour gérer le conflit vitesse précision, les conducteurs ajustent leur mouvement en fonction de la difficulté de la tâche (Davis, Cui et al. 2008), indépendamment main droite et main gauche (Goble and Brown 2007). La difficulté perçue de la tâche peut être différente selon les conducteurs et entraîner un stress. Selon (Michon 1985), les stratégies de conduite utilisées par le conducteur peuvent être plus ou moins automatisées et impliquer différents niveaux de prise de conscience. Elles dépendent d'un répertoire gestuel que le sujet sélectionne en mémoire, en vue de gérer son déplacement (Bellet 1998). En situation de stress, la sélection des adaptations motrices peut varier et le conducteur est alors peu répétable.

2/Pour négocier et contrôler la position du véhicule dans un virage, un conducteur utilise le point tangent du virage (Salvucci and Gray 2004), que ce soit en situation de conduite réelle ou en situation de conduite simulée (Wilson, Chattington et al. 2008). Dans une tâche de tracking en 2D, les

conducteurs ne peuvent pas utiliser cette information pour anticiper leur geste. Selon Kandil, Rotter et al. (2009), les conducteurs utilisant la stratégie du point tangent du virage ont une trajectoire plus stable, un geste de tourner le volant plus fluide et sont donc plus répétables.

3/Enfin, dans la présente étude, un simulateur fixe est utilisé. Par définition, il n'y a pas de forces centripètes générées par le mouvement de la route lors de la simulation de l'exercice de tourner le volant. Mestre and Authier (2012) montrent que les informations vestibulaires réduisent les dispersions dans les trajectoires et rendent les conducteurs plus répétables.

### **3.2.4. Conclusion**

Dans cette partie, le découpage des variables en fenêtres spatiales floues a été présenté. Pour les variables cinématiques, dynamiques et d'angles au volant, les plages de données sont découpées en 3 fenêtres : petite/moyenne/grande valeurs. Pour la position des mains sur le volant le volant a été découpé en 4 fenêtres. L'AFCM a été réalisée sur les valeurs d'appartenance des variables cinématiques et dynamiques du membre supérieur aux fenêtres floues. Cette analyse a mis en évidence que les variables d'efforts parallèles à la colonne de direction, le couple articulaire au poignet produit par la flexion (+)/extension (-) et par conséquent le couple créé sur le volant par un mouvement d'abduction (+)/adduction (-) de la main droite sont discriminants. L'analyse des résultats montre que les conducteurs discriminés par ces variables ont tendance à tirer le volant et mettent alors en évidence 2 profils : les pousseurs moyens et les tireurs. De plus, les résultats montrent que les différences inter-sujets sont plus importantes que les différences intra-sujets. Les différences intra-sujets sont faibles sauf pour deux conducteurs. Ces 2 sujets sont sensibles au virage et exercent des efforts plus importants sur le volant.

A partir des variables mise en évidence dans cette étude, le conducteur sain peut être considéré comme un sujet répétable qui pousse « moyennement » sur le volant (i.e. grande sollicitation de la fenêtre spatiale moyenne). Une nouvelle analyse est effectuée dans la partie suivante. Cette analyse vise à mettre en évidence les variables discriminantes en fonction de l'angle au volant. Le facteur temps est cette fois-ci pris en compte.

### **3.3. Analyse temporelle**

L'analyse temporelle des variables est également réalisée à partir d'une AFCM. L'objectif de cette analyse est d'appréhender la façon dont le mouvement et les variables évoluent dans un virage  $j$ . Pour cela, les virages sont découpés en fenêtres temporelles rectangulaires pour pouvoir comparer l'évolution des variables pour chaque sujet. L'AFCM permet notamment de trouver des oppositions d'évolution via les variables discriminantes chez les sujets qui ont des comportements différents dans un même virage (différences inter-sujets).

### 3.3.1. Découpage temporel des virages

La nomenclature des données utilisées dans le § 3.2.1 est conservée. Cette fois-ci, le découpage temporel peut être effectué de deux façons :

DT1 : absolu, c'est-à-dire qu'il est construit à partir d'une largeur de fenêtre a priori,

DT2 : relatif, c'est-à-dire un découpage adapté à la géométrie du virage (de 0 à 100%).

Le découpage temporel a pour objectif d'observer la chronologie du geste durant un virage. Les sept virages étant différents (Cf. chap. 2 §2.1.3), le découpage relatif (DT2) à la géométrie du virage semble difficile à mettre en place. Dans cette étude, pour montrer les différences inter et intra sujet, le découpage DT1 est plus approprié. En effet, la durée d'un virage est identique pour chaque individu dans chaque répétition. Le découpage peut alors être fait en créant un nombre de fenêtre d'une durée identique sur la durée de l'échantillon. Seul le nombre de fenêtres varie d'un essai à l'autre. Pour observer la chronologie du geste, considérer des fenêtres de 1 seconde est un bon compromis entre une largeur trop faible qui donnerait une analyse trop complexe (risquant de masquer les tendances) et une largeur trop grande qui générerait une trop grosse perte d'information (Fig. 106).

Pour l'analyse temporelle, une AFCM est réalisée sur le tableau  $I*J*K*T_j$  (avec  $T_j$  la durée du virage  $j$  variable d'un virage à l'autre) lignes et  $93*3+2*4=287$  colonnes

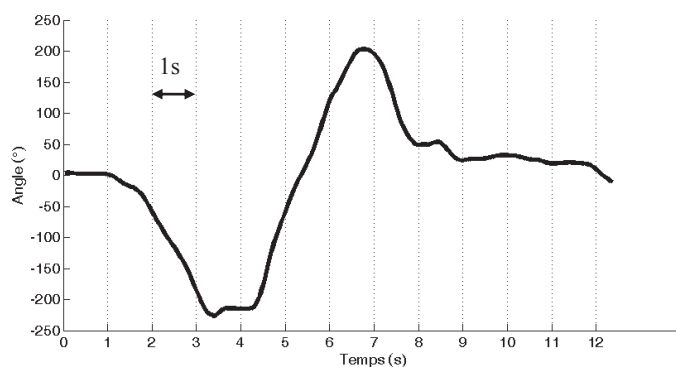


Fig. 106 : Exemple de découpages temporel en T fenêtres de 1s, sur un virage.

### 3.3.2. Résultats

L'axe 1 est représentatif de 14% de l'inertie totale des données. L'inertie de l'axe 2 est plus faible (9%). Seules les variables de l'axe 1 sont étudiées ici (plan factoriel Fig. 113, annexe 2).

Les résultats de l'AFCM opposent, sur l'axe 1, les variables HFzR+ et WTzR- de l'action du « tirer le volant » (côté droit) le volant aux variables HFzR- et WTzR+ de l'action de pousser le volant (côté

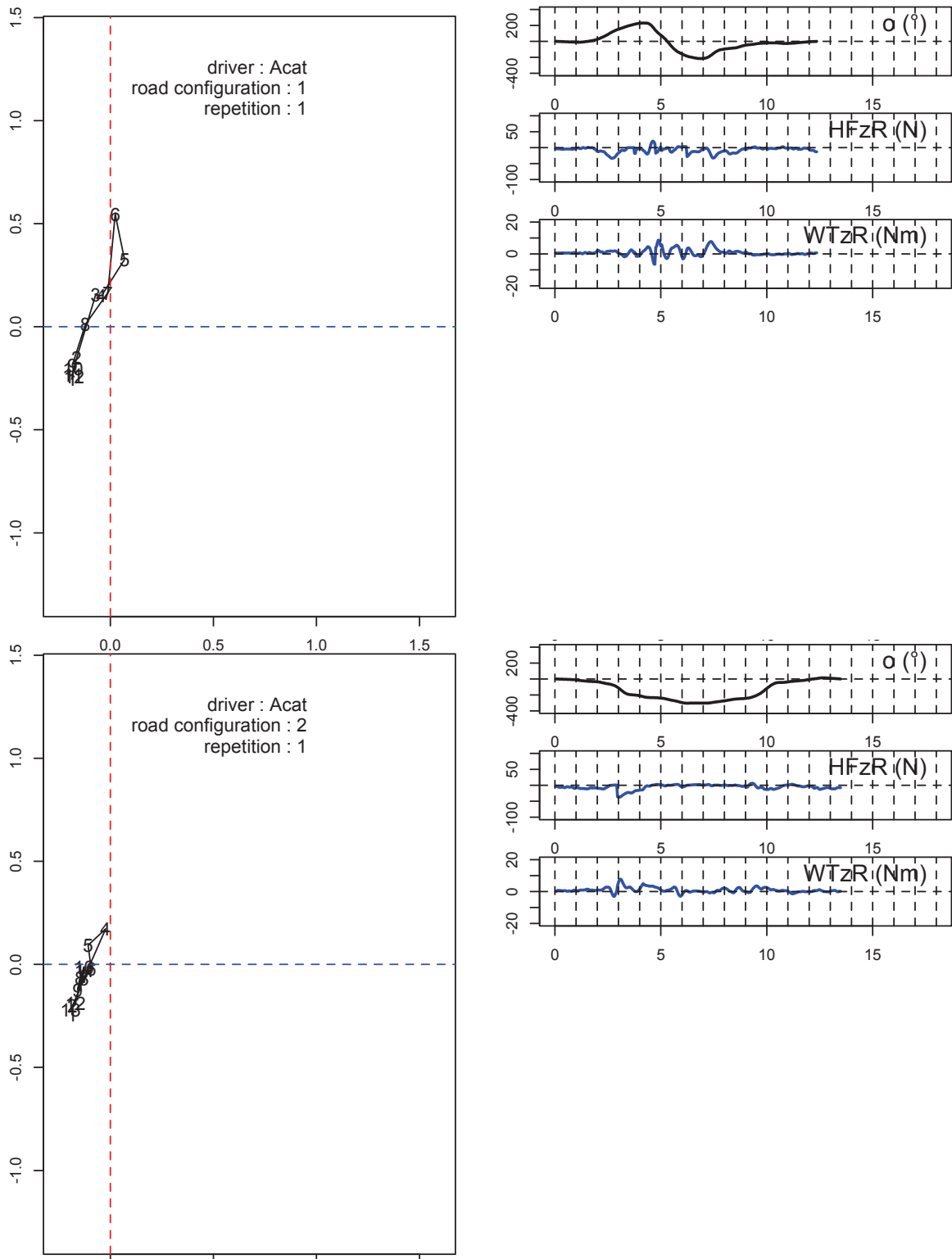
gauche) (Fig. 113). Comme à l'analyse précédente, les résultats montrent que Csan tire sur le volant lors de la conduite (variable HFzR+, située à droite de l'axe 1). Les deux profils nommés pousseur moyen et tireur dans l'étude atemporelle, sont repris.

Les Fig. 107 et Fig. 108 montrent les résultats de l'AFCM pour deux conducteurs, Acat et Csan, opposés sur l'axe 1. Les résultats de l'AFCM temporelle apparaissent à gauche de la figure : le nuage de point montre la position de la fenêtre temporelle (noté avec un numéro, ici t=1 à 12 pour ce virage) par rapport à la valeur d'appartenance de la fenêtre. Les lignes noires sont représentatives de la distance entre 2 fenêtres. A droite, les signaux bruts des variables discriminantes de l'axe 1 sont dessinés en bleu (HFzR et WTzR) et l'angle au volant réalisé est tracé en noir.

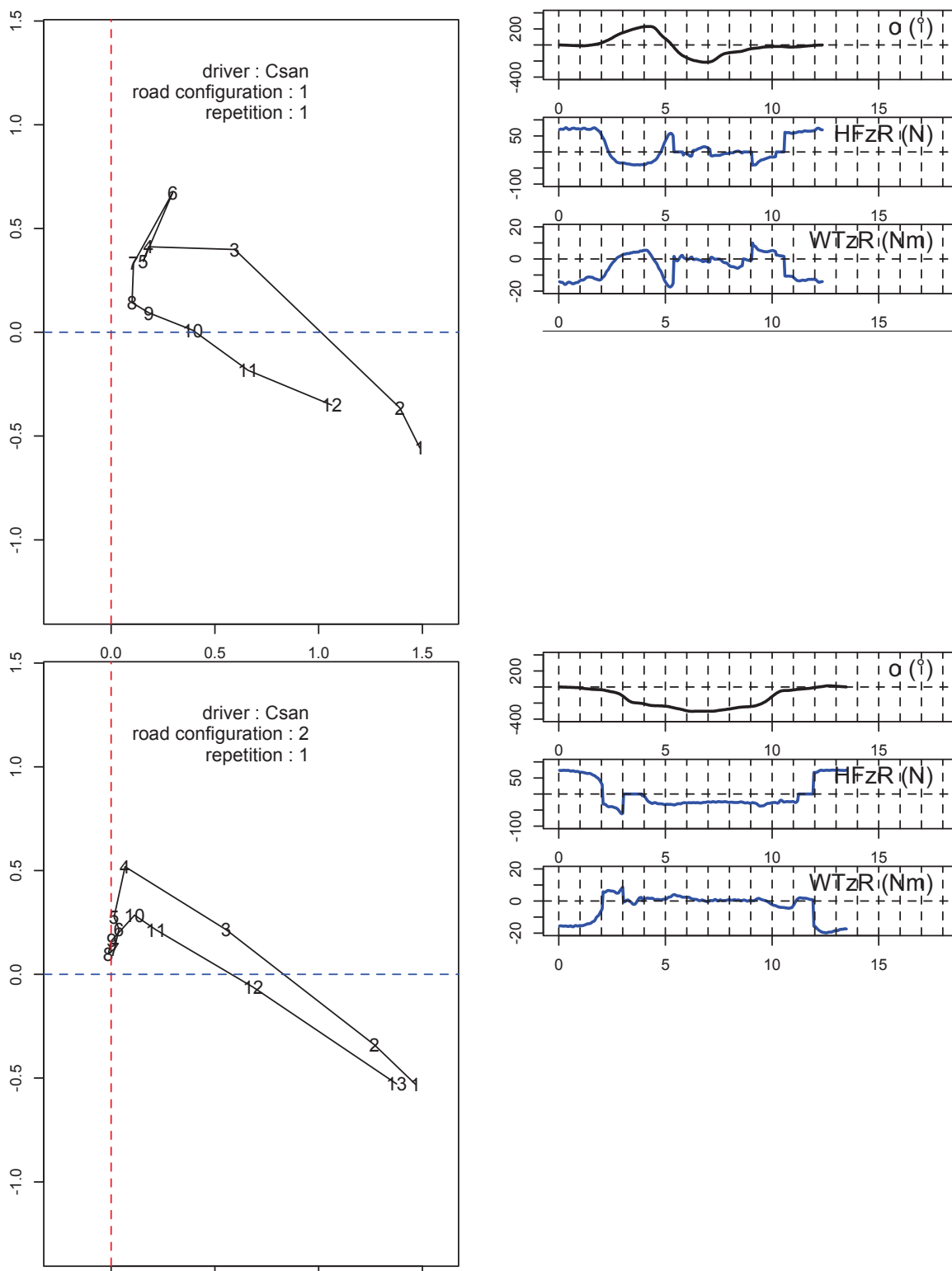
Ces deux conducteurs ont déjà été mis en opposition dans la première analyse, comme étant représentatif du pousseur moyen pour Acat et du tireur pour Csan. Ici, les distances entre les fenêtres temporelles t sont comparées entre les 2 sujets. Les résultats sont notés selon la nomenclature suivante : *Nom du sujet*<sub>k,j,t</sub> avec k le numéro de la répétition du virage, j le numéro du virage et t le numéro de la fenêtre temporelle :

- Pour les deux conducteurs, la première (t=1) et la dernière fenêtre (t=12) sont globalement situées au même endroit : des positions différentes des points t=1 et t=12 auraient indiqué une erreur dans les données, puisque le premier et le dernier point représentant les fenêtres spatiales représente des situations très similaires (ligne droite).
- Pour le passage de la fenêtre 1 à 2, la distance  $|x_{Csan111}-x_{Csan112}|$  est petite en relation avec l'angle de la consigne qui évolue peu et les variables HFzR et WTzR qui restent constantes. En parallèle,  $|x_{Acat111}-x_{Acat112}| < |x_{Csan111}-x_{Csan112}|$ . Ceci est en accord avec les résultats trouvés précédemment selon lesquels Acat est plus répétable que Csan. Enfin, la fenêtre t=1 est plus à droite pour que pour Acat. La distance  $x_{Csan111}$  par rapport au point d'intersection des axes 1 et 2 est largement supérieure à la distance  $x_{Acat111}$  entre la fenêtre t=1 du sujet Acat et le point d'intersection des 2 axes. Ceci s'explique car les modalités HFzR+ et WTzR- situées à droite de l'axe sont plus présentes pour Csan que Acat.
- Pour le passage de la fenêtre 2 à 3,  $|x_{Csan112}-x_{Csan113}| > |x_{Csan111}-x_{Csan112}|$ . Lorsque l'angle au volant demandé augmente (Fig. 108, courbe noire), il y a de fort changement dans l'utilisation des variables HFzR et WTzR: les données brutes (trait bleu sur la figure de droite) montrent que HFzR augmente alors que WTzR diminue. Pour Acat, ces variations sont peu visibles.
- Et ainsi de suite pour les transitions suivantes (fenêtre 3 à 4, 4 à 5, etc...).

Ces figures montrent également que le nuage de points dans l'AFCM est plus étalé pour Csan que pour Acat. Les conducteurs tireurs sont alors moins répétables que les pousseurs moyens.



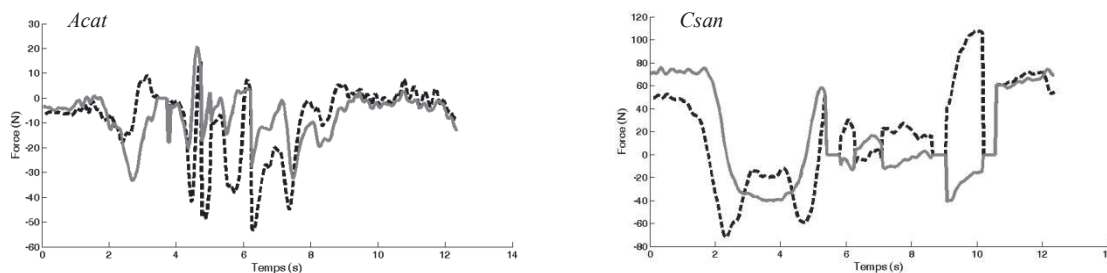
**Fig. 107 : Résultats de l'AFCM pour le conducteur ACat sur la répétition 1 du virage 1 et 2. A gauche les signaux en bleu correspondant à des variables ayant joué un rôle important dans l'AFCM (le signal en noir rappelle l'angle au volant).**



**Fig. 108 :** Résultats de l'AFCM pour le conducteur CSan sur la répétition 1 du virage 1 et 2. A gauche les signaux en bleu correspondant à des variables ayant joué un rôle important dans l'AFCM (le signal en noir rappelle l'angle au volant).

Une hypothèse peut être formulée pour expliquer ce transfert d'efforts entre l'action « je tire » et l'action « je relâche » le volant. La Fig. 109 montre que lorsque l'action de tirer le volant  $HFzR+$

diminue, la force résultante  $F_R = \sqrt{HFxR^2 + HFyR^2}$  augmente. A l'approche du virage, afin de faciliter la rotation du volant, les conducteurs tireurs ont tendance à pousser le volant et à augmenter les efforts moteurs ( $HFxR$  et  $HFyZ$ ) qui génèrent un couple pur dans le volant. Parallèlement, ce comportement est moins observable chez les autres conducteurs où les forces résultantes (x,y) évoluent de la même façon que la force en Z normale au plan du volant (Fig. 109, *Acat*).



**Fig. 109 : Evolution de la force résultante  $F_R$  (en pointillé noir) par rapport à la force  $HFzR$  normale au plan du volant (en gris), pour la 1ère répétition du 1er virage pour *Acat* à gauche et *Csan* à droite.**

### 3.3.3. Conclusion

Les virages ont été découpés en fenêtres temporelle de 1 s pour pouvoir comparer 2 virages identiques chez 2 sujets différents. Les résultats de l'analyse temporelle mettent en évidence les variables de tirer/pousser ( $HFzR$ ) et les couples articulaires produit par la flexion du poignet ( $WTzR$ ) comme variables discriminantes. L'évolution de ces variables au cours d'une répétition d'un virage pour les sujets *Acat* et *Csan* a été comparée, ces deux conducteurs pouvant être considérés comme deux représentants de deux classes différentes. Les résultats montrent que :

- Le pousseur moyen (e.g. *Acat*) est plus répétable que le tireur (e.g. *Csan*) : les distances entre les valeurs d'appartenance entre les fenêtres varient peu.
- Les efforts tendent vers 0 quand l'angle au volant augmente pour les deux profils (i.e. tireur ou pousseur moyen).

Le profil pousseur moyen est dominant dans la population testée.

## 4. Conclusion

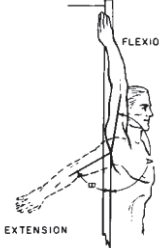
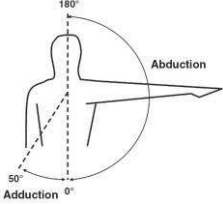
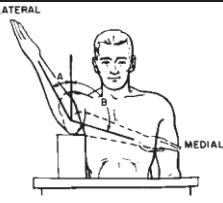
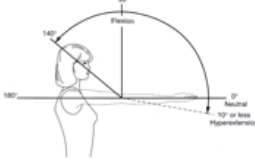
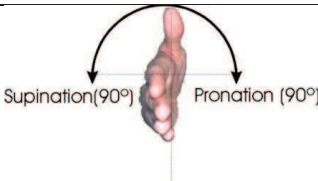
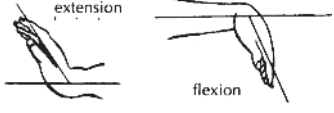
Ce chapitre a présenté la création de la base de données à étudier. Elles regroupent la variable directement mesurée (l'angle au volant) et des variables calculées (e.g. les angles articulaires). Au total, la base de données à analyser regroupe 95 variables pour chaque sujet dans les 6x7 répétitions de la tâche. Pour l'analyse de cette base de données 2 études ont été réalisées :



- Une analyse atemporelle pour mettre en évidence les variables discriminantes et les différences intra et inter sujets. Cette analyse est réalisée à partir d'une AFCM sur les fenêtres spatiales floues des variables à étudier. Les résultats ont montré que les variables dynamiques sont discriminantes, plus particulièrement l'action de tirer/pousser le volant. De plus les différences inter sujet sont plus grandes que les différences intra sujet. Le profil « pousseur moyen » est le profil dominant dans la population de l'étude.
- Une analyse temporelle est menée pour appréhender l'influence du facteur virage sur les variables. Les virages sont découpés en fenêtres temporelles de 1 s. Deux sujets ont été comparés dans la même répétition d'un virage sur les variables discriminantes de tirer/pousser sur le volant. Deux résultats ont été mis en évidence : les sujets qui poussent le volant sont plus répétables et les efforts appliqués sur le volant diminuent et tendent vers 0 quand l'angle du virage augmente afin de faciliter la rotation du volant.

Dans le chapitre suivant, les résultats de cette partie et de l'interaction cinématique main/volant sont synthétisés pour caractériser le profil multi variables du geste de tourner le volant chez les conducteurs sains. Des perspectives de recherches sur l'analyse de ce geste sont également proposées.

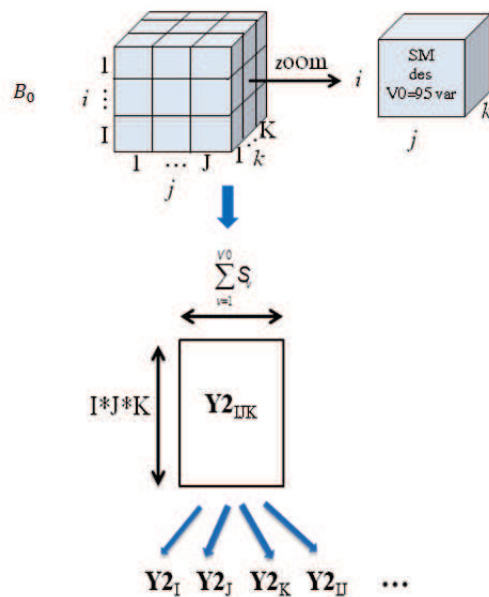
**Annexe 1** : Description des angles articulaires

Epaule	Flexion	
	Adduction/abduction	
	Rotation médiale	
Coude	Flexion	
	Pronation	
Poignet	Flexion	

**Annexe 2** : Résultats de l'AFCM sur le tableau 20\*6\*7 lignes actives et 93\*3+2\*4=287 colonnes

Pour mettre en évidence les variables discriminantes, le tableau B0 est transformé en un tableau des valeurs d'appartenance des variables aux fenêtres floues moyennées sur le temps. La moyenne sur des valeurs d'appartenance limite la perte des données.

Pour l'analyse atemporelle, une AFCM est réalisée sur le tableau  $I*J*K$  lignes et 93\*3+2\*4=287 colonnes (Fig. 110). La Fig. 111 montre le plan factoriel de cette AFCM.



**Fig. 110** : Mise en forme des données pour l'étude atemporelle.

Les lignes de la table  $Y2_{IJ}$  et mise  $Y2_{Ik}$ , mises en illustratif sont analysées pour montrer les différences inter et intra sujet en moyennant respectivement le facteur répétition et le facteur virage.



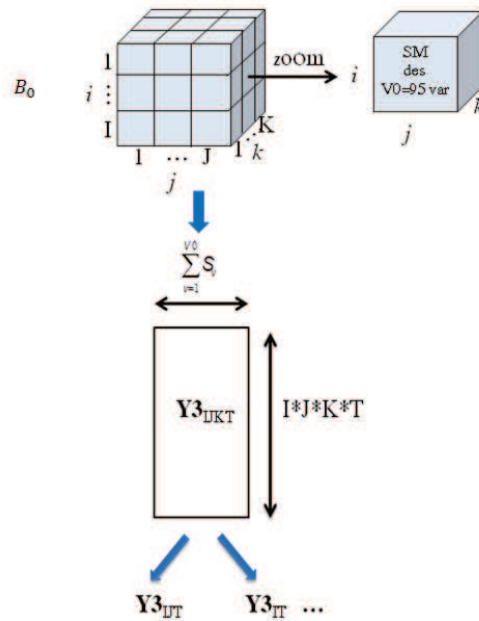


Fig. 112 : Mise en forme des données pour l'analyse temporelle.

La Fig. 113 présente le plan factoriel des points colonnes de cette analyse.

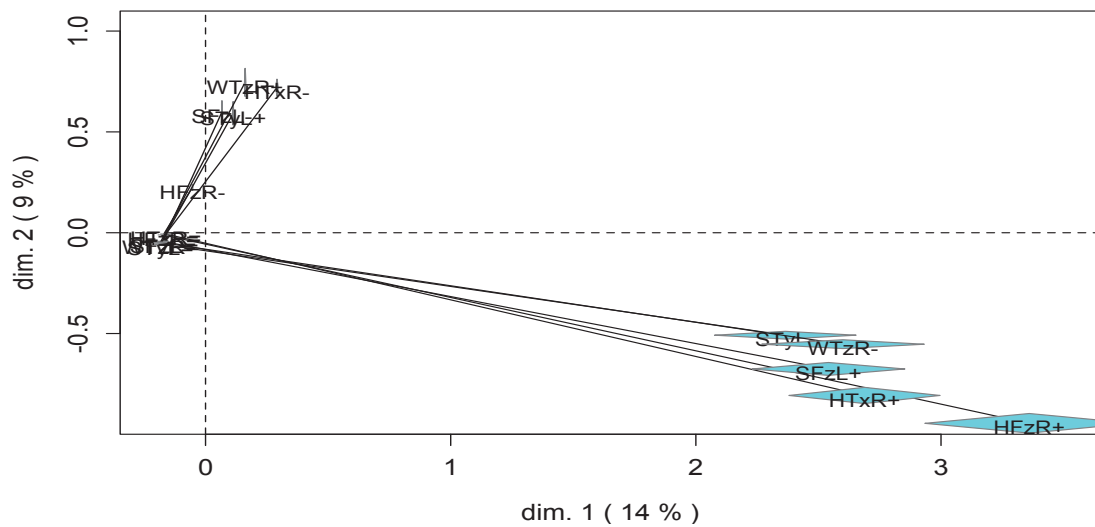


Fig. 113 : Plan factoriel de l'AFM sur le tableau  $Y_{IJKT}$  avec  $I*J*K*T$  lignes et  $93*3+2*4=287$  colonnes.

**Annexe 3** : Description des variables

Le tableau suivant donne les nomenclatures utilisées pour définir les 95 variables de l’AFCM.

Nomenclature	Unité	Description français
E2fL	°/s <sup>2</sup>	double dérivée flexion coude gauche
E2fR	°/s <sup>2</sup>	double dérivée flexion coude droit
E2pL	°/s <sup>2</sup>	double dérivée pronation coude gauche
E2pR	°/s <sup>2</sup>	double dérivée pronation coude droit
S2aL	°/s <sup>2</sup>	double dérivée abduction épaule gauche
S2aR	°/s <sup>2</sup>	double dérivée abduction épaule droite
S2fL	°/s <sup>2</sup>	double dérivée flexion épaule gauche
S2fR	°/s <sup>2</sup>	double dérivée flexion épaule droite
S2rL	°/s <sup>2</sup>	double dérivée rotation épaule gauche
S2rR	°/s <sup>2</sup>	double dérivée rotation épaule droite
O2	°/s <sup>2</sup>	Double dérivée angle volant
W2aL	°/s <sup>2</sup>	double dérivée abduction poignet gauche
W2aR	°/s <sup>2</sup>	double dérivée abduction poignet droit
W2fL	°/s <sup>2</sup>	double dérivée flexion poignet gauche
W2fR	°/s <sup>2</sup>	double dérivée flexion poignet droit
EFxL	N	Force coude axe X gauche
EFxR	N	Force coude axe X droit
EFyL	N	Force coude axe Y gauche
EFyR	N	Force coude axe Y droit
EFzL	N	Force coude axe Z gauche
EFzR	N	Force coude axe Z droit
ETxL	N.m	Moment coude axe X gauche
ETxR	N.m	Moment coude axe X droit
ETyL	N.m	Moment coude axe Y gauche
ETyR	N.m	Moment coude axe Y droit
ETzL	N.m	Moment coude axe Z gauche
ETzR	N.m	Moment coude axe Z droit

ETzR	N.m	Moment coude axe Z droit
EfL	°	Flexion coude gauche
EfR	°	Flexion coude droit
EpL	°	Pronation coude gauche
EpR	°	Pronation coude droit
HL	°	Position angulaire main gauche
HR	°	Position angulaire main droite
HFxL	N	Force volant axe X main gauche
HFxR	N	Force volant axe X main droite
HFyL	N	Force volant axe Y main gauche
HFyR	N	Force volant axe Y main droite
HFzL	N	Force volant axe Z main gauche
HFzR	N	Force volant axe Z main droite
HTxL	N.m	Moment volant axe X main gauche
HTxR	N.m	Moment volant axe X main droite
HTyL	N.m	Moment volant axe Y main gauche
HTyR	N.m	Moment volant axe Y main droite
HTzL	N.m	Moment volant axe Z main gauche
HTzR	N.m	Moment volant axe Z main droite
SFxF	N	Force épaule axe X gauche
SFxF	N	Force épaule axe X droit
SFyL	N	Force épaule axe Y gauche
SFyR	N	Force épaule axe Y droit
SFzL	N	Force épaule axe Z gauche
SFzR	N	Force épaule axe Z droit
STxL	N.m	Moment épaule axe X gauche
STxR	N.m	Moment épaule axe X droit
STyL	N.m	Moment épaule axe Y gauche
STyR	N.m	Moment épaule axe Y droit

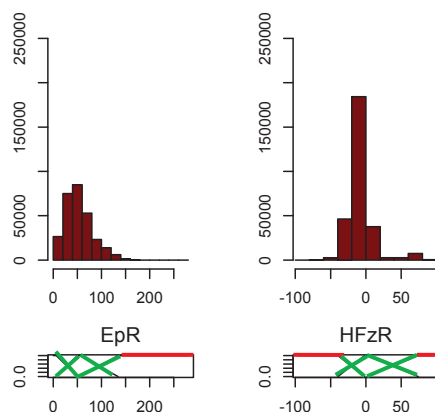
STzL	N.m	Moment épaule axe Z gauche
STzR	N.m	Moment épaule axe Z droit
SaL	°	Abduction épaule gauche
SaR	°	Abduction épaule droit
SfL	°	Flexion épaule gauche
SfR	°	Flexion épaule droit
SrL	°	Rotation épaule gauche
SrR	°	Rotation épaule droit
E1fL	°/s	Dérivée flexion coude gauche
E1fR	°/s	Dérivée flexion coude droit
E1pL	°/s	Dérivée pronation coude gauche
E1pR	°/s	Dérivée pronation coude droit
S1aL	°/s	Dérivée abduction épaule gauche
S1aR	°/s	Dérivée abduction épaule droit
S1fL	°/s	Dérivée flexion épaule gauche
S1fR	°/s	Dérivée flexion épaule droit
S1rL	°/s	Dérivée rotation épaule gauche
S1rR	°/s	Dérivée rotation épaule droit
O1	°/s	Dérivée angle volant
W1aL	°/s	Dérivée abduction poignet gauche
W1aR	°/s	Dérivée abduction poignet droit
W1fL	°/s	Dérivée flexion poignet gauche
W1fR	°/s	Dérivée flexion poignet droit
O	°	Angle volant
WFxL	N	Force poignet axe X gauche
WFxR	N	Force poignet axe X droit
WFyL	N	Force poignet axe Y gauche
WFyR	N	Force poignet axe Y droit
WFzL	N	Force poignet axe Z gauche



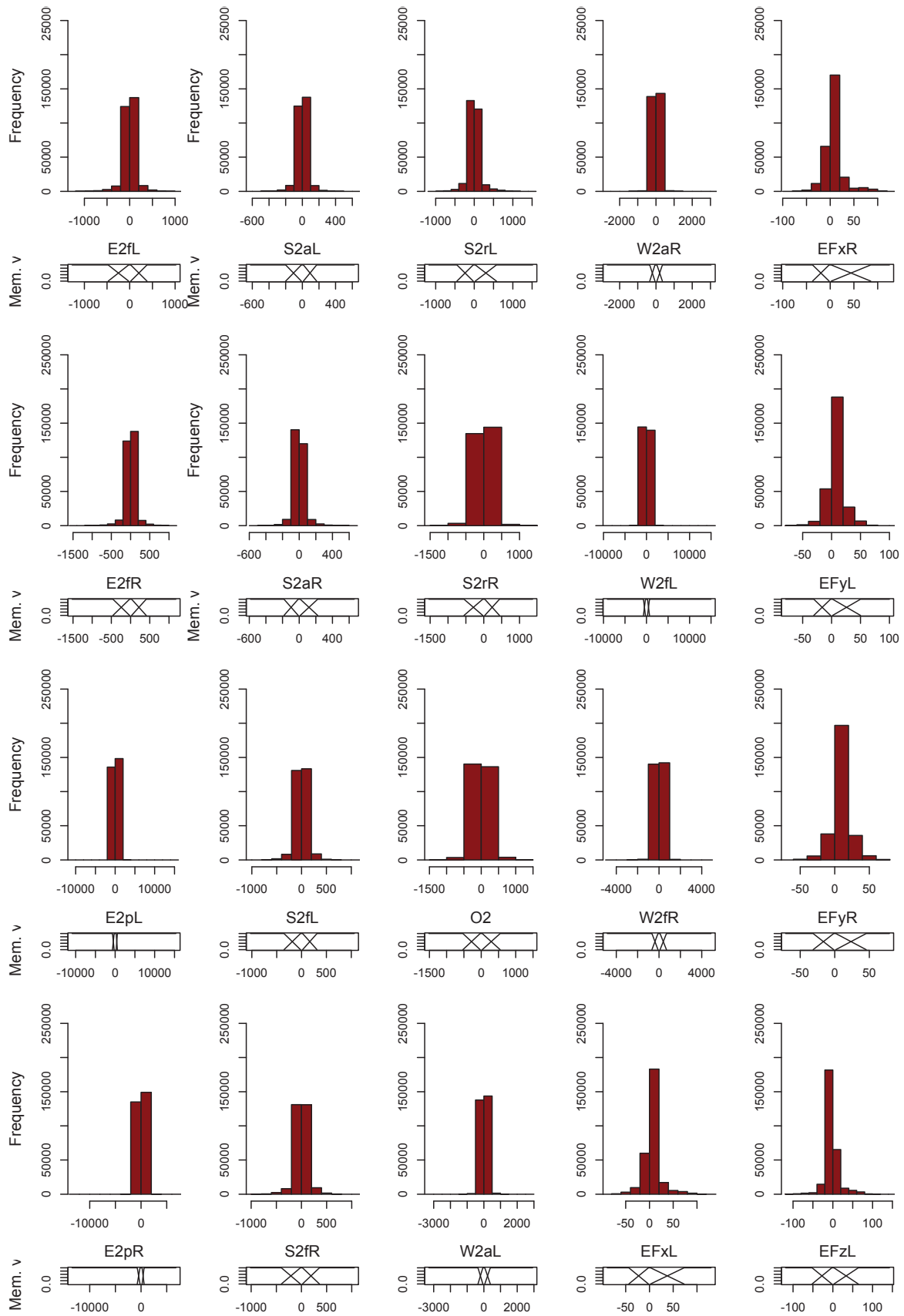
WFzR	N	Force poignet axe Z droit
WTxL	N.m	Moment poignet axe X gauche
WTxR	N.m	Moment poignet axe X droit
WTyL	N.m	Moment poignet axe Y gauche
WTyR	N.m	Moment poignet axe Y droit
WTzL	N.m	Moment poignet axe Z gauche
WTzR	N.m	Moment poignet axe Z droit
WaL	°	Abduction poignet gauche
WaR	°	Abduction poignet droit
WfL	°	Flexion poignet gauche
WfR	°	Abduction poignet droit

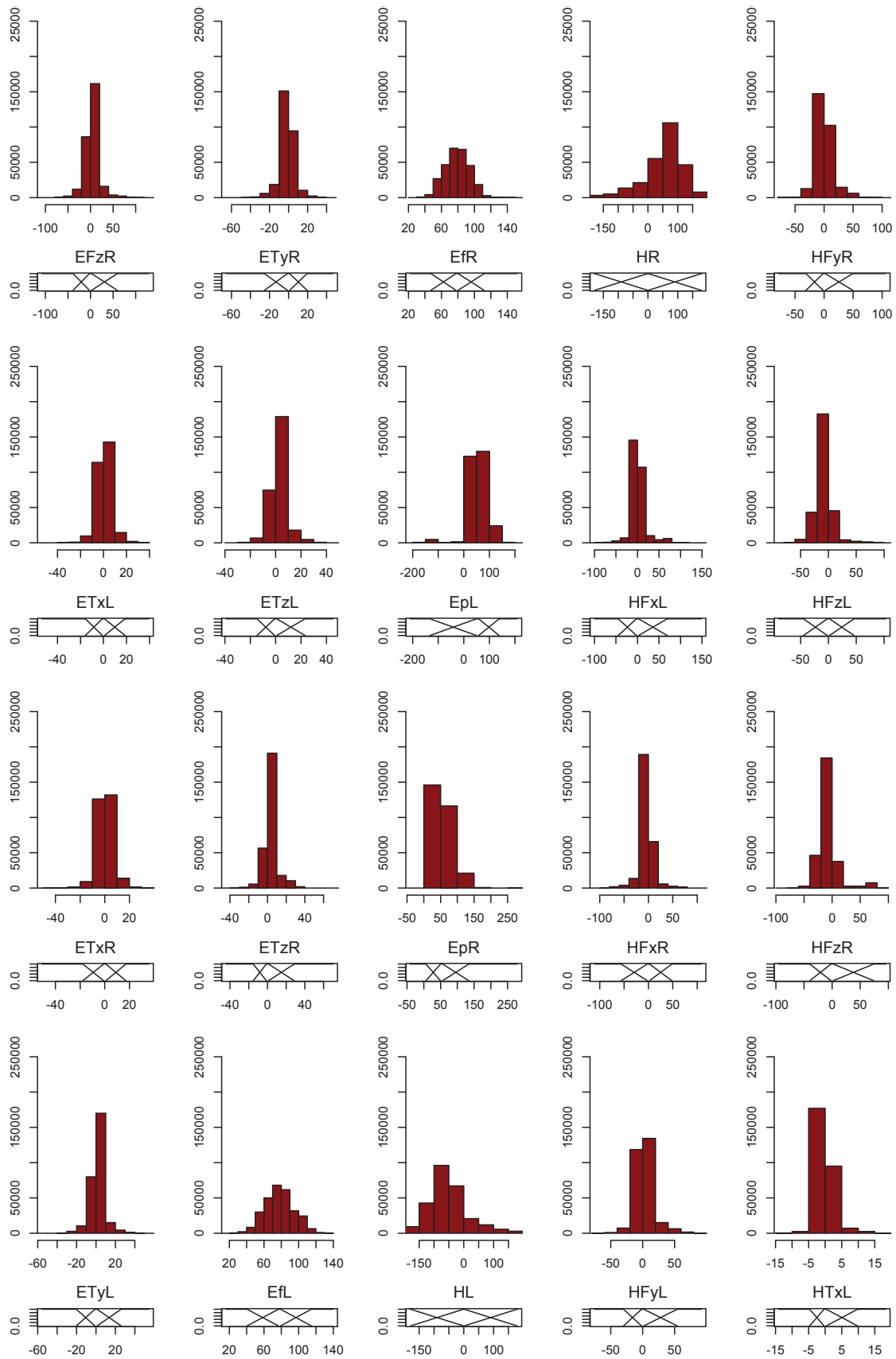
**Annexe 4 : Histogrammes**

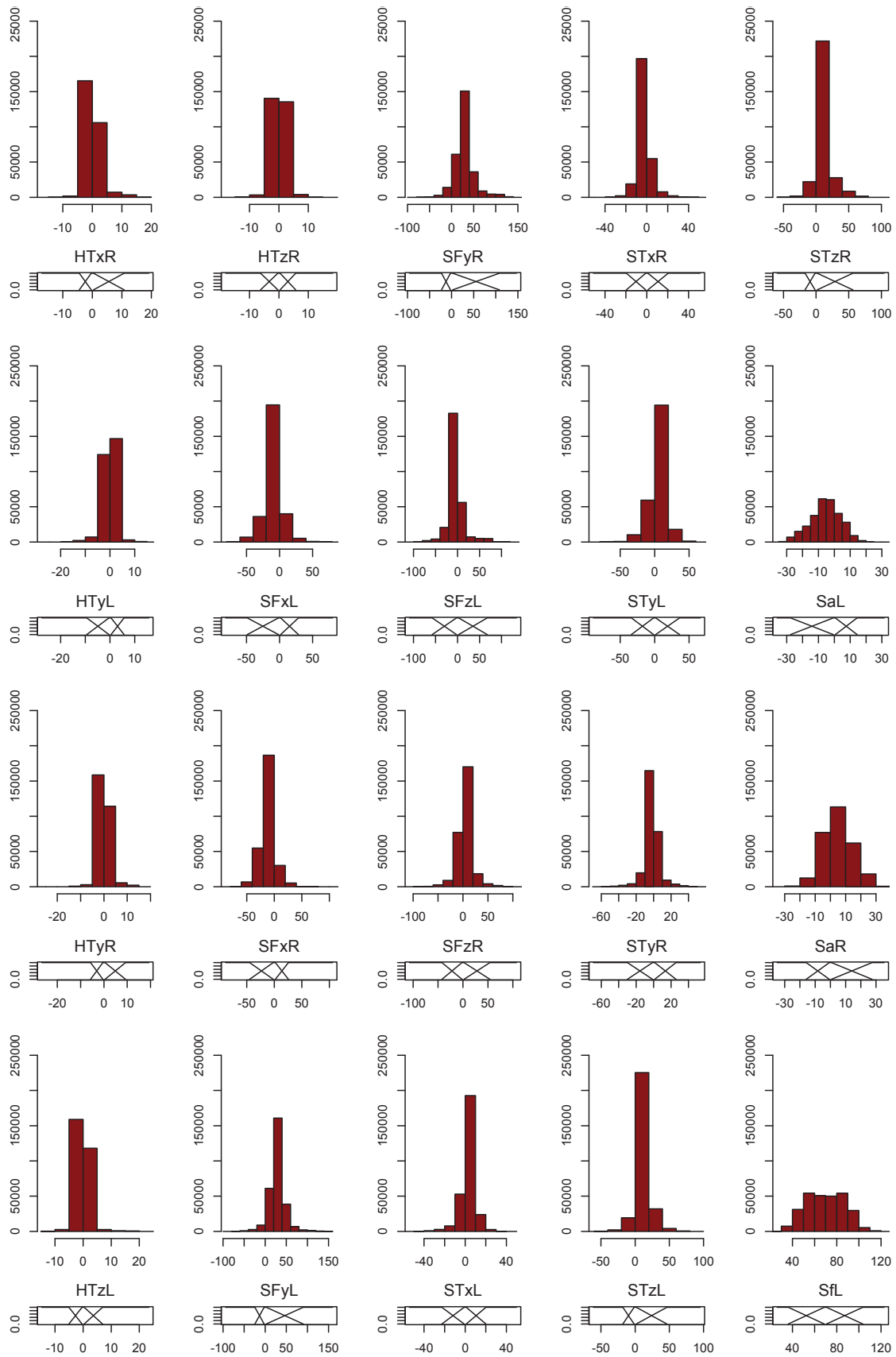
Pour créer les fenêtres spatiales, l’histogramme de chaque variable est construit sur la totalité des échantillons relatifs aux 20 sujets x 6 répétitions x 7 virages. Les valeurs extrémales correspondantes à 1% des données sont supprimées (les histogrammes montrent l’existence de valeurs anormalement grandes et/ou petites). Cette étape permet de : vérifier les données (plages de mesure cohérentes, présence de valeur extrémales aberrante...) et de choisir un découpage adapté (centré en 0 ou par rapport à la moyenne arithmétique). La Fig. 114 présente les histogrammes et le découpage des variables  $EpR$  centrée selon la moyenne arithmétique et  $HFzR$ , centrée en 0. Le signe des variables n’a pas été modifié : les variables négatives correspondent à la modalité p et les variables peu négatives (de module faible) correspondent à la modalité G. les variables moyennes correspondent à la modalité m, centrée en 0 ou par rapport à la moyenne arithmétique de la plage de donnée. Les autres histogrammes sont présentés dans la suite de cette annexe.

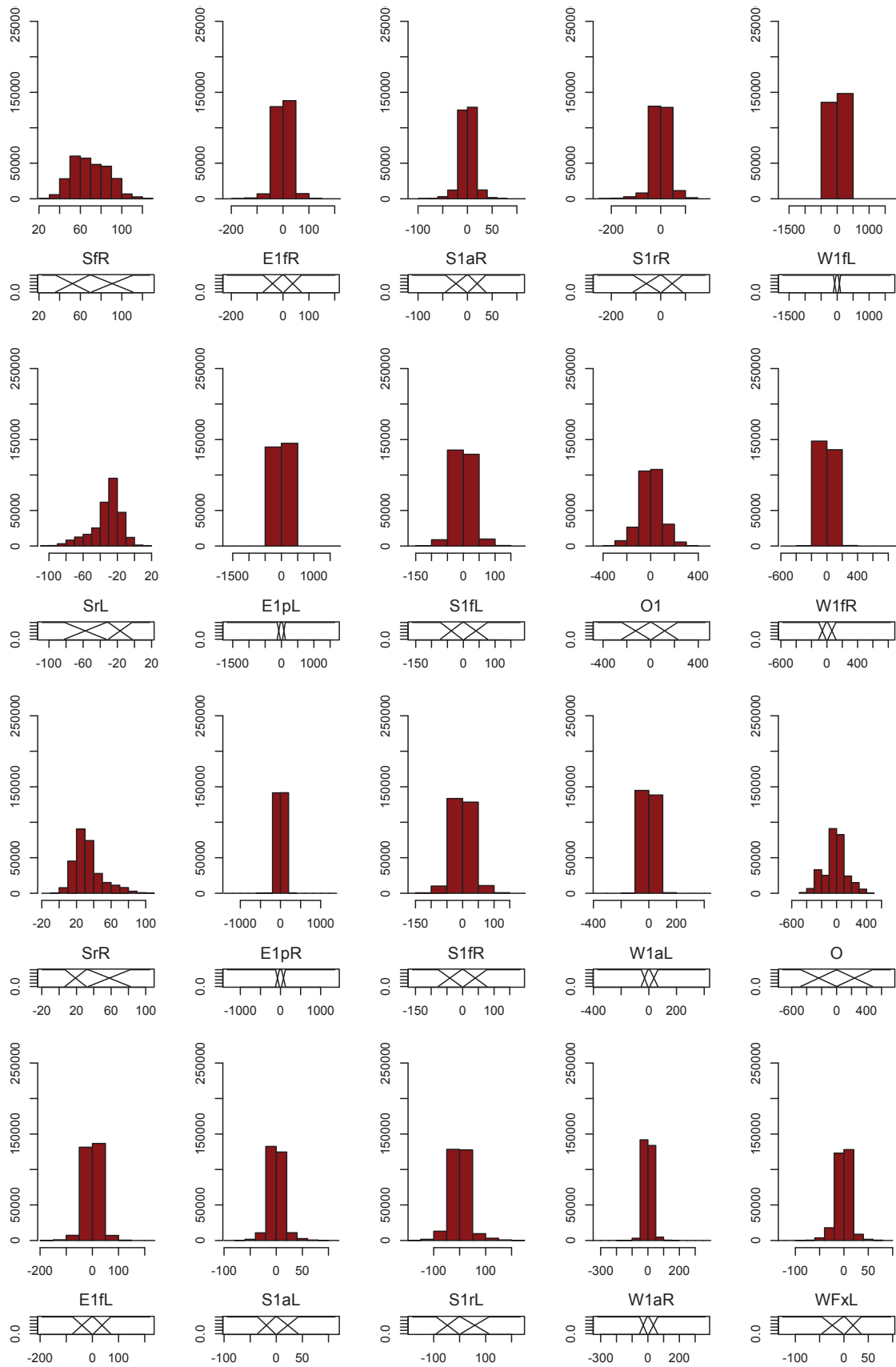


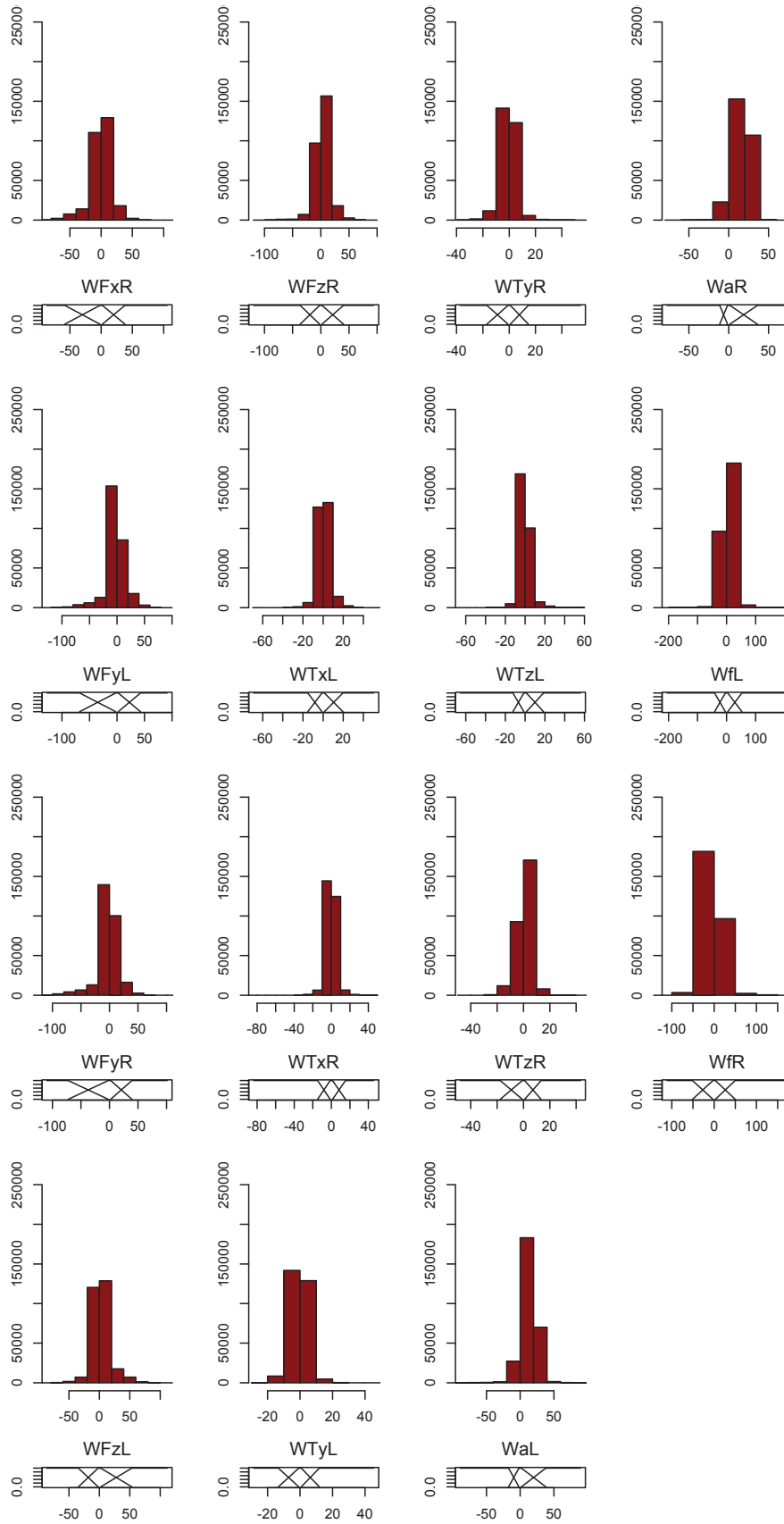
**Fig. 114 : Histogramme de la variables  $EpR$  à gauche et de la variable  $HFzR$  à droite. En dessous, découpage flou proposé selon l’étendue des valeurs : en vert les fenêtres triangulaires représentant 99% des données, en rouge les fenêtres trapézoïdes pour les valeurs extrémales.**



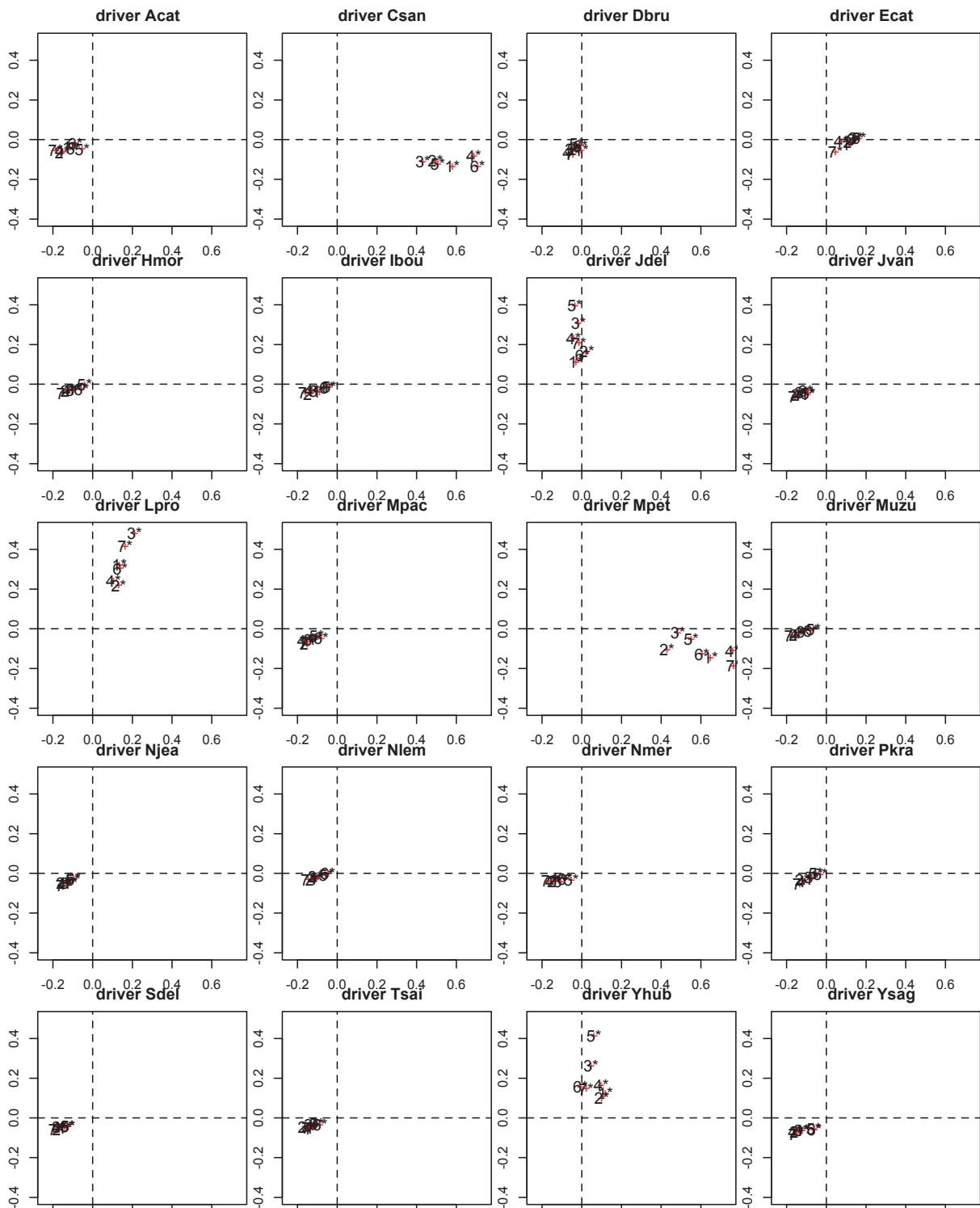






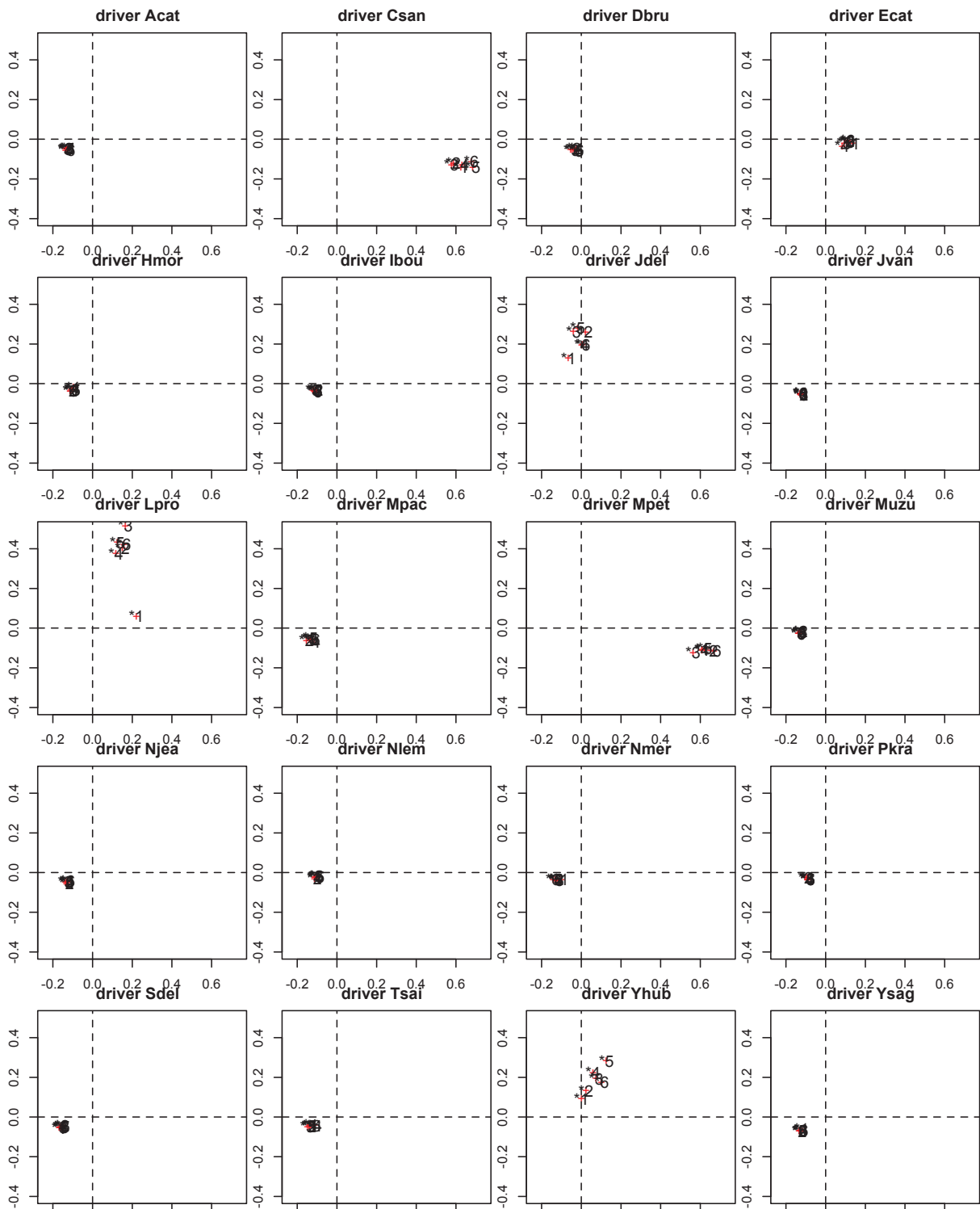


**Annexe 5 : Résultats de l’AFCM sur le tableau 20 sujets x 6 virages**





**Annexe 6 : Résultats de l’AFCM sur le tableau 20 sujets x 7 répétitions**





---

## **CHAPITRE 5**

# **SYNTHESE DES RESULTATS ET PERSPECTIVES DE RECHERCHES**

---

## 1. Introduction

Ce chapitre fait la synthèse de ce travail de recherche et présente quelques perspectives de recherches. Il se compose de deux parties. Dans une première partie, une synthèse de la méthodologie et l'analyse de l'interaction cinématique main/volant et de l'analyse multi variables du geste de tourner le volant est réalisée. Les conclusions relatives à la compréhension du geste de tourner le volant ont permis la création d'un profil de référence du conducteur sain. Dans une deuxième partie, des perspectives de recherches à plus ou moins long termes sur l'analyse du geste de tourner le volant sont proposées.

## 2. Synthèse du travail de thèse

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre du projet ANR VTT VolHand dont l'objectif est de mettre au point des directions assistées électriques pour automobile adaptées aux personnes âgées et/ou handicapées. Le réglage actuel des directions assistées électriques est peu adapté à un public ayant des déficiences du membre supérieur car il est réglé sur le ressenti de sujets sains. L'étude bibliographique de la tâche de conduite a montré que peu d'études ont ciblé le geste de tourner le volant dans sa globalité. Les mécanismes biomécaniques de ce geste sont alors peu connus et ne permettent pas, actuellement, un réglage mieux adapté de la direction assistée automobile. Dès lors, l'objectif général de ce travail de thèse est de faire une analyse de l'interaction cinématique main/volant et une analyse multi variables du geste de tourner le volant du conducteur sain à partir de variables cinématiques et dynamiques pour mieux comprendre le geste de tourner le volant.

Pour cela, une plateforme expérimentale a été spécialement conçue. Le simulateur automobile utilisé est équipé d'un volant 3 branches à retour d'efforts permettant de mesurer les efforts exercés par chaque main sur le volant. Une interface visuelle de manœuvres à basse vitesse a été proposée, à partir de l'angle au volant enregistré sur un véhicule réel. Elle est projetée en 2D pour éviter les dispersions dans les trajectoires du véhicule et pouvoir comparer les gestes de tourner le volant. Le volant et l'interface visuelle ont été validés à partir d'une pré-étude. Le volant n'induit pas de biais dans la tâche de tourner le volant par rapport à un volant normal. L'interface visuelle est réalisable par tous les sujets et conduit à des stratégies de pose de mains différentes chez les conducteurs.

Le protocole expérimental mis en place permet l'acquisition de données cinématiques des membres supérieurs à partir de caméras Vicon®, de données dynamiques avec le volant instrumenté, de données de l'activité électrique des principaux muscles du membre supérieur via des EMG, des caractéristiques et du ressenti des sujets à travers des questionnaires post-expérimentaux. Ce protocole a été réalisé sur une population de conducteurs sains, âgés et avec des déficiences du membre supérieur. Seules les données cinématiques et dynamiques des sujets sains<sup>19</sup> sont exploitées dans ce mémoire.

Les données recueillies sont directement mesurées (i.e. efforts au volant ou position des membres supérieurs) ou calculées (i.e. angles ou efforts interarticulaire) à l'aide d'un modèle biomécanique du membre supérieur. Ce modèle se compose de 4 segments rigides (main, avant-bras, bras, clavicule) et

---

<sup>19</sup> N.b.: suite à des problèmes d'acquisition, les analyses portent sur 23 sujets lorsque seule la cinématique des mains est étudiée et 20 sujets lorsque les données font intervenir les efforts au volant.

3 articulations (poignet, coude, épaule). Sept angles articulaires et les efforts développés au sein des 3 articulations sont calculés. Au total, ce sont 95 variables à analyser pour caractériser le geste de tourner le volant dans les situations de manœuvres à basse vitesse. L'analyse biomécanique du geste de tourner le volant s'est déroulée en deux études :

- La première a consisté à étudier l'interaction cinématique mains/volant. Cette étude a pour objectif de déterminer les stratégies de tourner le volant chez une population de conducteurs sains. Cette interaction a été décrite dans deux études. La première étude réalisée à partir des coordonnées 3D des mains et à l'aide de densitogramme met en évidence les différentes stratégies de mouvement de mains. La deuxième analyse permet d'étudier la répétabilité intra et inter sujet à partir de la position angulaire des mains sur le volant via un découpage flou du volant et une AFCM (Analyse Factorielle des Correspondances Multiples) Cette méthode offre l'avantage d'étudier la répétabilité intra et inter-sujets lors de l'interaction main/volant pour un geste complexe évoluant dans le temps.
- Dans la seconde étude, les variables cinématiques et dynamiques du membre supérieur lors d'un geste de tourner le volant ont été analysées via une analyse multi variables. Une base de données qui rassemble l'angle au volant et des variables calculées (i.e. angles articulaires, efforts sur le volant et efforts interarticulaires) a été créée. L'étude de cette base de donnée s'articule autour de deux objectifs : 1/rechercher les variables discriminantes du geste de tourner le volant et 2/montrer l'influence du facteur « virage » sur les variables composant cette base. Pour cela, deux analyses sont réalisées. La première analyse permet au travers d'une AFCM sur un découpage spatial atemporel de chacune des variables, afin de rechercher les variables qui différencient les conducteurs. La deuxième analyse est effectuée sur des fenêtres temporelles pour comprendre l'influence du facteur virage sur l'évolution des variables.

Les résultats ont mis en exergue des stratégies de mouvement de mains différentes qui permettent de définir trois types de profils de conducteurs sains : les croiseurs, les croiseurs asymétriques et les non croiseurs. Le profil croiseur est dominant dans la population de conducteurs sains étudiés. L'analyse multi variables de la base de données des membres supérieurs montre que les variables dynamiques différencient les conducteurs. Deux profils apparaissent : les pousseurs moyens et les tireurs. La majorité des conducteurs sains exerce des efforts de poussée modérés mais non négligeables sur le volant alors que d'autres tirent fortement sur le volant. Néanmoins, l'analyse temporelle montre que ces différences se réduisent quand l'angle au volant augmente : l'approche du virage (i.e. quand l'angle au volant augmente), les efforts normaux (pousser ou tirer) exercés sur le volant diminuent et deviennent quasi nul.

Aussi, les résultats ont montré que les différences inter sujets sont plus grandes que les différences intra : les sujets sains sont en grande majorité répétables quelque soit le virage ou sa répétition. Autrement dit, le conducteur met en place une stratégie motrice préférentielle (pose des mains, mouvement des bras, efforts appliqués...) qu'il adopte quelque soit la tâche. Seuls quelques sujets sont

sensibles au virage. Les conditions expérimentales (simulateur fixe, vitesse de défilement de la trajectoire imposée, utilisation du 2D) peuvent être une hypothèse explicative à ce phénomène (sensibilité au virage).

Pour résumer, le profil type du conducteur sain est un conducteur répétable, croiseur qui a tendance à pousser sur le volant. La Fig. 115 résume la synthèse de l'étude.

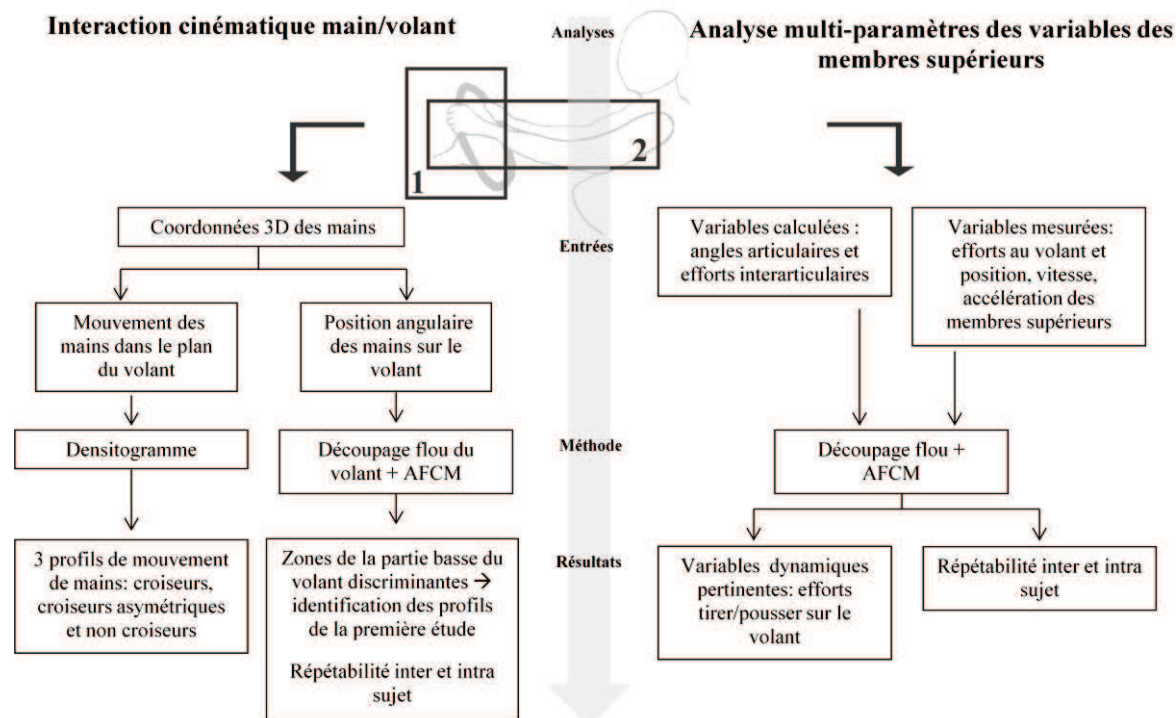


Fig. 115 : Synthèse de l'étude

### 3. Perspectives

Cette analyse du geste de tourner le volant a montré que les conducteurs sains privilégient la stratégie de croisement de mains dans le scénario de conduite proposé. Ces conducteurs sont répétables dans leur mouvement et la pose des mains sur le volant. Les résultats ont également montré que les efforts normaux au plan du volant sont non négligeables et qu'ils permettent de différencier les conducteurs. Les perspectives de l'étude visent alors à :

- Poursuivre l'analyse du geste de tourner le volant chez le conducteur sain.
- A étendre l'analyse aux conducteurs âgés et pathologiques ayant participé à l'étude.

La suite du paragraphe propose des perspectives de recherche à court, moyen et long terme.

#### 3.1. A court terme

Les perspectives à court terme visent à augmenter la base de données des conducteurs sains :

- en limitant la perte des marqueurs : Pendant les expérimentations, des marqueurs se décollent et tombent, des marqueurs disparaissent derrière le volant ou sont occultés lors du croisement

de mains. Cette perte d'informations ne peut pas toujours être compensée par les outils d'interpolation fournis dans l'interface logicielle du Vicon ®. L'utilisation d'un modèle d'optimisation globale de reconstruction des coordonnées de position des marqueurs comme utilisé par Roux (2002) ou (Debril 2011 (a)) peut être une solution adaptée à la perte des marqueurs sur une longue durée.

- en étudiant les données EMG non exploitées dans le manuscrit. La littérature a mis en avant 8 muscles principaux dans un mouvement de tourner le volant de petites amplitudes. L'étude des données EMG dans une situation de manœuvres à basse vitesse permettrait de compléter les patterns d'activation présentés pour un geste contraint. Elle permettrait également de comparer les muscles sollicités par les sujets sains et les sujets avec des déficiences du membre supérieur pour une meilleure compréhension des mécanismes de compensations mis en place par des conducteurs pathologiques dans une tâche de tourner le volant.
- En rajoutant les données objectives des questionnaires dans l'AFCM pour mettre en relation le mouvement réalisé et les caractéristiques du sujet. Les questionnaires pourront également être utilisés dans l'analyse des sujets âgés et pathologiques pour localiser les zones douloureuses lors d'un mouvement de tourner le volant.

### **3.2. A moyen terme**

Les méthodes d'analyse mises en place dans cette thèse ont été validées sur les sujets sains. Elles peuvent être reprises sur les données acquises pour la totalité de la population sains, âgé et pathologique ayant participé à l'étude. L'idée est de classer la population en différents profils au regard des variables pertinentes trouvées. Ainsi, il suffirait de regarder ces variables pour connaître la classe d'appartenance du sujet. Le profil de référence du conducteur appartiendrait à la classe dominante.

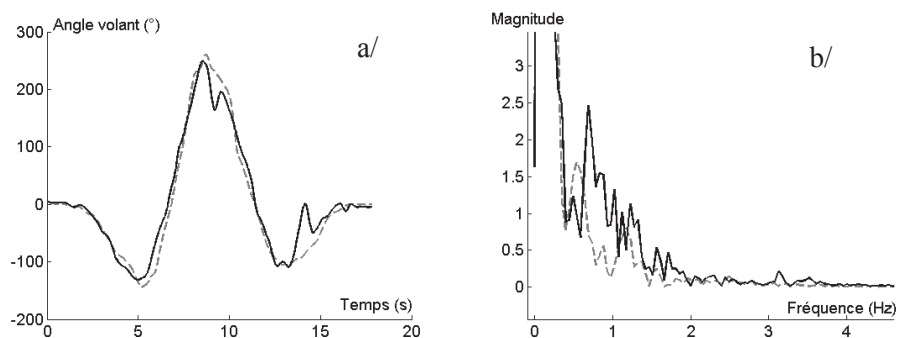
Pour autant, des difficultés sont à envisager concernant l'exploitation des données sur les sujets pathologiques. Premièrement, la construction d'un modèle biomécanique du conducteur pathologique est difficile car les données anthropométriques de cette population sont peu renseignées dans la littérature et fortement changeantes d'un sujet à l'autre. De plus, l'apparition de douleurs ou de fatigues par rapport à la tâche inciteraient le conducteur pathologique à adopter des stratégies (position de main, efforts au volant...) différentes au cours de la tâche. La répétabilité intra sujets pourrait être moins évidente. Il est possible d'envisager l'existence de plusieurs profils dans cette population. Enfin, l'exploitation des données EMG peut se révéler difficile, notamment chez les conducteurs atteints de myopathie où le signal EMG est très bruité ou quasi inexistant.

### **3.3. A long terme**

Trois perspectives à plus long terme peuvent être explorées :

- Une nouvelle variable qui différencie les sujets pourrait être exploitée : l'analyse fréquentielle de l'angle au volant. La littérature montre que la fluidité de l'action sur le volant est un

paramètre critique de la conduite (Chien 2006). Une gestion saccadée du volant, générant des perturbations hautes fréquences, peut être un indicateur de la classe d'âge du conducteur (McGehee, Lee et al. 2004). La courbe de l'angle au volant est plus saccadée pour le conducteur avec des déficiences motrices, sur ce virage (Fig. 116a). Du point de vue de l'analyse fréquentielle de ces signaux (Fig. 116b), ces saccades sont interprétées comme des perturbations à haute fréquence. Un signal plus saccadé a plus d'énergie à hautes fréquences qu'un signal plus lisse, représentatif d'une action plus fluide sur le volant. Gabrielli, Schiro et al. (2012) proposent un indicateur fréquentiel calculé à partir de l'angle au volant réalisé et du spectre fréquentiel pour différencier les conducteurs. Le spectre fréquentiel du signal d'angle du volant est obtenu en utilisant la transformée de Fourier et l'angle au volant par la steer-by-wire. Cet indicateur a été testé sur les 2 groupes (sains et avec déficiences du membre supérieur) dans les 42 virages (6 répétitions \* 7 virages). Les résultats montrent qu'il est possible de différencier les 2 populations dans 93% des virages. Pour aller plus loin, l'étape suivante serait la classification des sujets à partir de cet indicateur.



**Fig. 116 : a/ Angles au volant réalisés par un conducteur sain (pointillé) et par un conducteur avec déficiences (trait plein) pour un virage. b/ spectre fréquentiel de l'angle au volant pour le conducteur sain (pointillés) et le conducteur avec déficiences (trait plein) dans le même virage.**

- Pour mieux comprendre le geste de tourner le volant, l'estimation de la force musculaire au travers d'un modèle musculo-squelettique peut être envisagé à partir de la modification et l'adaptation du modèle de Pick and Cole (2006 (b)). En faisant l'hypothèse que l'action des muscles est indépendante et que la tension de l'électrode de surface est proportionnelle à la force du muscle en situation isométrique, les auteurs proposent une équation de régression permettant de prédire le couple au volant à partir de l'activité musculaire. Le modèle est construit à partir de nombreuses hypothèses restrictives : exercice en condition isométrique, main fixe sur le volant et position du bras connue, le sujet a pour consigne d'appliquer des forces tangentielles au volant dans le sens horaire et anti-horaire et seuls les moments articulaires de l'épaule et du coude sont considérés comme intervenant dans ce geste. Or, il



serait intéressant de considérer le couple articulaire du poignet, non négligeable dans le mouvement de tourner le volant. Néanmoins, différents types de difficultés sont pressenties :

- Le modèle à créer est complexe car la géométrie du membre supérieur évolue avec la conduite.
- Le calcul des efforts interarticulaires chez les sujets pathologiques peut poser problème de part la difficulté à construire un modèle biomécanique adapté.
- Les variables mises en évidence dans ce manuscrit ont permis de mieux comprendre le geste de tourner le volant. Au regard des résultats obtenus et avec l'aide des automaticiens impliqués dans le projet ANR VTT VolHand, l'ajout de nouvelles variables (e.g. la force normale sur le volant) à prendre en compte dans l'assistance des directions pourrait être envisageable.

#### **4. Conclusion**

Dans ce chapitre, la synthèse des résultats et la proposition de perspectives de recherche ont été faites.

Les résultats ont mis en évidence des variables discriminantes et une forte répétabilité intra-sujet dans notre population de conducteurs sains. Le mouvement et la pose des mains ainsi que les variables d'effort de tirer/pousser sur le volant différencient les conducteurs dans un geste de tourner le volant en situation de manœuvres à basse vitesse. Le profil de tourner le volant dominant de la population testée est un conducteur croiseur qui pousse le volant de façon modérée mais non négligeable par rapport aux efforts exercés sur les autres axes. Ce profil de référence constitue une base de comparaison pour caractériser les adaptations mise en place par un public de conducteurs ayant des capacités physiques diminuées.

Les perspectives données proposent, à court terme, d'augmenter la base de données des conducteurs sains en améliorant la reconstruction des marqueurs 3D à l'aide d'un modèle d'optimisation globale et en exploitant les données des EMG et les questionnaires. Elles proposent également, à moyen terme, d'appliquer les méthodes d'analyses développées dans ce manuscrit sur les données des conducteurs âgés et pathologiques pour les comparer aux sujets sains. Des adaptations du modèle biomécanique seront à envisager au regard des particularités physiques des conducteurs pathologiques. Enfin, à plus long terme, l'analyse fréquentielle de l'angle au volant peut être une nouvelle variable permettant de différencier/reconnaître les conducteurs. De plus, un modèle dynamique du conducteur intégrant les efforts interarticulaires du poignet, dans le modèle dynamique du conducteur développé par Pick and Cole (2006 (b)), permettrait d'estimer le couple de rotation du volant à partir des forces musculaires développées par le membre supérieur dans une tâche de tourner le volant. De nouvelles variables pourraient être incrémentées dans les lois de commandes des directions assistées électriques pour mieux les adapter au conducteur.



---

## **CONCLUSION GENERALE**

---

Les travaux présentés dans cette thèse partent du constat établi dans le premier chapitre : le geste de tourner le volant est une tâche complexe peu étudiée dans la littérature. Une analyse multi variables de ce geste est proposée dans le but de mieux comprendre le geste de tourner le volant chez le conducteur sain. Ce travail de cette thèse fait partie intégrante du projet ANR VTT VolHand.

Le chapitre 1 a réalisé l'état de l'art. Il souligne l'importance des variables cognitives et motrices dans la conduite automobile. D'un point de vue cognitif, ce chapitre montre que la situation de conduite proposée doit susciter la réponse motrice « je tourne le volant » et permettre l'anticipation du conducteur avant chaque virage. Un retour d'effort au volant est à prévoir pour un meilleur contrôle de la trajectoire. Le 2D est préféré au 3D pour éviter les trop grandes dispersions de trajectoires et pouvoir comparer le geste de tourner le volant des conducteurs. D'un point de vue moteur, ce chapitre montre que le mouvement des membres supérieur ainsi que l'interaction main/volant doit être analysée car elle permet de différencier les conducteurs. La conception d'une interface visuelle et d'un simulateur de conduite permettant l'acquisition des variables cinématique et dynamique du membre supérieur droit et gauche est alors recommandée. Le protocole, présenté au deuxième chapitre, a été pensé pour que le conducteur se concentre uniquement sur le geste de tourner le volant. Un scénario de manœuvres à basse vitesse a été construit à partir de l'enregistrement d'angles au volant réalisé dans un véhicule réel. Les sujets ont pour consigne de maintenir le curseur représentatif de la position du volant sur une ligne représentant le déplacement angulaire du volant. La ligne, projetée, défile à vitesse constante et simule une série de lignes droites et de virages enregistrés au préalable sur un véhicule réel. Le sujet gère simplement le déplacement du curseur, la vitesse de défilement étant imposée. Un simulateur compact a été construit spécialement pour l'étude. Son volant est équipé d'une steer-by-wire simulant le contact pneu chaussé et provoquant un retour d'effort dans le volant. Il est également équipé de trois dynamomètres 6 composantes pour avoir les efforts exercés par les deux mains simultanément. Le simulateur permet l'acquisition de la cinématique des membres supérieurs via le système optoélectronique Vicon. Le sujet réalise 6 scénarii de 7 virages distribués de façon aléatoire. Chaque scénario dure 2 mn.

La campagne de mesure s'est déroulée dans 3 laboratoires d'analyse du mouvement différents et sur des sujets sains, pathologique et âgés (121 sujets au total). Le dépouillement des 26 marqueurs Vicon qui équipent les membres supérieurs et le tronc de 95 sujets a été réalisé sous Vicon Nexus. Les variables recueillies peuvent être analysées directement (i.e. l'angle au volant) ou demandent des calculs (i.e. efforts interarticulaires). La base de données étudiée dans ce manuscrit se compose de variables cinématiques (position des mains, angle articulaire, et les vitesses et accélérations des articulations), de variables dynamiques (les forces et moments exercés par la main sur le volant et les efforts inter articulaire) et de l'angle au volant de 23 sujets sains.

L'analyse du geste de tourner le volant s'est déroulée en deux temps : une étude de l'interaction cinématique main/volant dans un premier temps (chapitre 3), puis une analyse multi variables sur l'ensemble des variables de la base de données présentée dans le chapitre 4.

L'analyse des l'interaction cinématique main/volant a été réalisée en deux étapes dans le chapitre 3. Dans un premier temps, les différents profils de mouvement des mains utilisées dans une situation de

manœuvres à basse vitesse sont identifiés à partir des coordonnées 3D des mains et à l'aide de densitogramme et d'un indicateur numérique. Dans un second temps, pour observer la répétabilité inter et intra des conducteurs dans un geste de tourner le volant une analyse spatiale de la pose des mains grâce à un découpage flou du volant et une AFCM est réalisée. Les résultats de la première étude mettent en avant trois stratégies de mouvement de main, identifiée par trois profils : croiseur, non croiseur et croiseur asymétrique. Les résultats de l'AFCM montrent cette fois ci deux grandes tendances les sujets qui utilisent uniquement la partie haute du volant et ceux qui sollicite la partie latérale en favorisant le côté droit pour la main droite et gauche pour la main gauche. Ces tendances sont rapprochées respectivement des profils croiseurs/croiseurs asymétriques et non croiseurs, trouvés à l'étude précédente. Cette analyse montre également que les différences inter sujets sont plus grandes que les différences intra sujets : les conducteurs sains utilisent des stratégies de pose de main identique entre chaque répétition de virages. La stratégie de pose de main dominante dans la population saine est le croisé.

Pour une vision globale du geste de tourner le volant, l'ensemble des variables cinématiques et dynamiques mesurées et calculées a été analysé à partir d'une analyse atemporelle et temporelle, dans le chapitre 4. L'analyse atemporelle a été menée pour mettre en évidence les variables discriminantes et les différences intra et inter sujets. Cette analyse est réalisée à partir d'une AFCM sur les fenêtres spatiales floues des variables à étudier. Les résultats ont montré que l'action de tirer/pousser le volant discrimine les conducteur. Le profil « pousseur moyen » est le profil dominant dans la population de l'étude. L'analyse temporelle est menée pour appréhender l'influence du facteur virage sur les variables. Deux résultats ont été mis en évidence : les sujets qui poussent le volant sont plus répétables et les efforts appliqués sur le volant diminuent et tendent vers 0 quand l'angle du virage augmente afin de faciliter la rotation du volant.

La synthèse des résultats réalisée au cinquième chapitre montre que l'interaction cinématique main/volant et les efforts normaux au plan décrivent le geste de tourner le volant. Pour résumer, dans la majorité des participants de l'étude, le conducteur sain est un conducteur croiseur qui pousse le volant. Son geste est répétable quelque soit le virage réalisé. L'analyse du geste de tourner le volant permet deux orientations de recherches complémentaires, à plus ou moins long terme :

- Pour mieux comprendre le geste de tourner le volant, d'autres variables discriminantes peuvent être recherchées. La méthodologie d'analyse présentée dans ce manuscrit peut être appliquée chez les participants âgés et pathologiques ayant participé à l'étude, pour mettre en évidence les variables discriminantes dans ces populations et comparer les gestes de tourner le volant.
- Pour continuer dans la lignée du projet VolHand, un modèle dynamique issu des données expérimentales permettrait d'estimer le couple de rotation du volant. Ainsi de nouvelles variables pourraient être incrémentées dans les lois de commande des directions assistées électriques pour mieux les adaptées à un public hétérogène.



## Ce travail a fait l'objet des publications suivantes

### *Publications acceptées :*

#### Revue internationale avec comité de lecture

Gabrielli F., Paganelli S., **Schiro J.**, Pudlo P., Djemai M. (2012). *Simulation platform for steering wheel gesture measurement*. International Journal of Industrial Ergonomics, 42, pp. 469-477

Gabrielli F., **Schiro J.**, Pudlo P., Barbier F., Djemai M., Bouilland S., Thevenon A. (2012). *Frequency based indicator for driver differentiation during steering exercises*. Advancement of Modelling and Simulation techniques in Entreprise, Modeling C, pp. in press.

**Schiro J.**, Gabrielli F., Pudlo P., Barbier F., Djemai M. (accepté avec modifications mineures) *Steering Wheel Hand Position in Low-Speed Maneuvers*. Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour.

#### Conférence internationale avec actes et comité de lecture

**Schiro J.**, Gabrielli F., Pudlo P., Barbier F., Djemai M. (2011). *Estimation de l'angle de flexion/extension du coude dans une tâche de tourner le volant en l'absence du marqueur médial de l'épicondyle de l'humérus*. 14<sup>ème</sup> congrès international de l'ACAPS, Rennes, France, octobre.

**Schiro J.**, Gabrielli F., Pudlo P., Dupuy M-A., Anceaux F., Barbier F., Djemai M. (2011). *Validation d'une consigne visuelle simple pour l'analyse du geste chez le conducteur automobile*. Conférence Internationale sur l'accessibilité et les systèmes de suppléance aux personnes en situations de handicap, Paris, France, janvier.

#### Conférence nationale avec actes et comité de lecture

Gabrielli F., **Schiro J.**, Pudlo P., Djemai M., Bouilland S., Thevenon A. (2012). *Indicateur pour différencier les conducteurs automobiles durant les manœuvres à basse vitesse*. Handicap 2012, 7ème congrès sur les aides techniques pour les personnes handicapées, Paris, France, juin.

**Schiro J.**, Gabrielli F., Pudlo P., Barbier F., Djemai M. (2011). *Méthode d'analyse du placement de main lors d'une tâche de conduite à basse vitesse – Etude préliminaire*. XXXVIème Congrès de la Société de Biomécanique, Besançon, France, janvier.

**Schiro J.**, Gabrielli F., Pudlo P., Barbier F., Djemai M. (2012). *Normal/tangential force proportion during steering under simulation condition*. XXXVIIème Congrès de la Société de Biomécanique, Toulouse, France, octobre.

## Conclusion générale

### *Publications soumises :*

#### Revue internationale avec comité de lecture

Gabrielli, F., Pudlo P., **Schiro J.**, Bouilland S., Thevenon A., (soumis) *Driver classification method based on smoothness of steering action*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.

**Schiro J.**, Loslever, P., Pudlo, P., Gabrielli F., (soumis, en révision) *Hand position coordination study in driving*. Ergonomics.

#### Conférence internationale avec actes et comité de lecture

Loslever, P., **Schiro J.**, Pudlo P., (soumis) *A multiple Correspondence Analysis and Fuzzy Set based approach for the analysis of pathology drivers from healthy drivers. A case study with the steering wheel control*, 12th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems, Las Vegas, USA, juillet 2013

#### Conférence nationale avec actes et comité de lecture

**Schiro J.**, Gabrielli F., Pudlo P., Barbier F., Djemai M. (soumis) *Comparison of steering forces of Healthy VS Disabled drivers under simulation condition*. XXXVIIIème Congrès de la Société de Biomécanique, Marseille, France, septembre 2013.



---

## **BIBLIOGRAPHIE**

---

## Bibliographie

---

- Advani, S. and R. Hosman (2001). "Integrated motion cueing algorithm and motion base design for effective road vehicle simulation." Driving Simulation Conference.
- Ait El Menceur, M. O. (2009). "Modélisation, Analyse et Simulation du Mouvement d'Entrée dans les Véhicules Automobiles à Géométrie Variable: Application au mouvement d'entrée des personnes âgées et/ou ayant des déficiences motrices." Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambresis.
- Allard, P. and J.-P. Blanchi (2000). "Analyse du mouvement humain par la biomécanique." 2ème édition.
- Allard, P., J. P. Blanchi, et al. (1990). "Technique de lissage et de filtrage de données biomécaniques." Science and Sports **5**(1): 27-38.
- Amberkar, S., F. Bolourchi, et al. (2004). "A control system methodology for steer-by-wire systems." World Congress & Exhibition, SAE Technical Paper, 2004-01-1106.
- Atkinson, R. C. and R. M. Shiffrin (1968). "Human memory: a proposed system and its control processes." The Psychology of Learning and Motivation : Advances in research and Theory. **II**.
- Badawy, A., J. Zuraski, et al. (1999). "Modelling and analysis of an electric power steering system." SAE Technical Paper 1999-01-0399.
- Bailly, B. E. (2004). "Conscience de la situation des conducteurs : Aspects fondamentaux, méthodes et application pour la formation des conducteurs." Thèse de Doctorat en Psychologie Cognitive, Université Lumière Lyon 2.
- Balasubramanian, V. and K. Adalarasu (2007). "EMG-based analysis of change in muscle activity during simulated driving." Journal of Bodywork and Movement Therapies **11**(2): 151-158.
- Bellet, T. (1998). "Modélisation et simulation cognitive de l'opérateur humain: une application à la conduite automobile." Thèse de doctorat, Université Paris V, Paris.
- Biryukova, E. V., A. Roby-Brami, et al. (2000). "Kinematics of human arm reconstructed from spatial tracking system recordings." Journal of Biomechanics **33**(8): 985-995.
- Boer, E. R. (1996). "Tangent point oriented curve negotiation " IEEE Intelligent Vehicles Symposium: 7-12.
- Boff, K. R. and J. E. Lincoln (1988). "The vestibular system " Engineering data Compendium: Human Perception and Performance, AAMRL, Wright-Patterson AFB: 766-787.
- Bouilland, S. (1997). "Etude biomécanique des levers de charge isocinétique et naturel - Application à la rééducation des lombalgies chroniques." Thèse de doctorat en Automatique Industrielle et Humaine, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis.
- Bràt, V., V. Stejskal, et al. (1979). "The derivation of general kinematic equations of spatial constrained mechanical systems with the aid of a computer." Mechanism and Machine Theory **14**(5): 341-347.
- Brooks, J. O., R. R. Goodenough, et al. (2010). "Simulator sickness during driving simulation studies." Accident Analysis and Prevention **42**(3): 788-796.
- Calais-Germain, B. (1984). Anatomie pour le mouvement. Tome 1 : Introduction à l'analyse des techniques corporelles.

- Cantin, V., M. Lavallière, et al. (2009). "Mental Workload when driving in a simulator: Effects of age and driving complexity." Accident Analysis & Prevention **41**: 763-771.
- Cappozzo, A., F. Catani, et al. (1995). "Position and orientation in-space of bones during movement - Anatomical frame definition and determination." Clinical Biomechanics **10**(4): 171-178.
- Carey, S. L., M. J. Highsmith, et al. (2008). "Compensatory movements of transradial prosthesis users during common tasks." Clinical Biomechanics **23**(9): 1128-1135.
- Cassavaugh, N. D. and A. F. Kramer (2009). "Transfert of computer-based training to simulated driving in older adults." Applied Ergonomics **40**(5): 943-952.
- CGDD (2011). "Consommation des ménages et environnement." Service de l'observation et des statistiques, Ministère de l'Ecologie, du Développement durable des Transports et du Logement.
- Chèze, L., C. Gutierrez, et al. (1996). "Biomechanics of the upper limb using robotic techniques." Human Movement Science **15**(3): 477-496.
- Chien, W.-P. (2006). "A study on the control performance of the car steering wheel." Thèse de doctorat, Université de Tatung, Taiwan.
- Davis, N. J., S. S. Cui, et al. (2008). "The dynamics of reciprocal aiming with a steering wheel." Experimental Brain Research **188**(1): 141-146.
- De Waard, D., T. G. M. P. R. Van den Bold, et al. (2009). "Driver hand position on the steering wheel while merging into motorway traffic." Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour **13**(2): 129-140.
- Debril, J. F. (2011 (a)). "Analyse et modélisation du mouvement de transfert de la personne paraplégique." Thèse de doctorat en Automatique Industrielle et Humaine, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis.
- Debril, J. F., P. Pudlo, et al. (2011 (b)). "Impact of handgrip adjustment on lateral transfers performed by an individual with spinal cord injury." DHM, Lyon, France.
- Desroches, G., R. Dumas, et al. (2010). "Upper limb joint dynamics during manual wheelchair propulsion." Clinical Biomechanics **25**(4): 299-306.
- Edgren, C. S., R. G. Radwin, et al. (2004). "Grip force vectors for varying handle diameters and hand sizes." Human Factors **46**(2): 244-251.
- Eksioglu, M. and K. Kizilaslan (2008). "Steering-wheel grip force characteristics of drivers as a function of gender, speed, and road condition." International Journal of Industrial Ergonomics **38**(3-4): 354-361.
- Fourie, M., D. Walton, et al. (2010). "Naturalistic observation of drivers hands, speed and headway." Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour **14**(5): 413-421.
- Fuller, R. A. (1984). "Conceptualization of driving behaviour as threat avoidance." Ergonomics **27**(11): 1139-1155.
- Gabrielli, F., P. Pudlo, et al. (2012 (a)). "Instrumented Steering Wheel for Biomechanical Measurements." Mechatronics **22**(5): 639-650.

- Gabrielli, F., J. Schiro, et al. (2012). "Indicateur pour différencier les conducteurs automobiles durant des manoeuvres à basse vitesse." Conférence Handicap 2012, Paris, 2012.
- Gamage, S. S. H. U. and J. Lasenby (2002). "New least squares solutions for estimating the average centre of rotation and the axis of rotation." Journal of Biomechanics **35**(1): 87-93.
- Gillet, C. (2004). "Analyse biomécanique de la marche et proposition de classes de marcheurs - Application au portage du sac à dos." Thèse de doctorat en sciences et techniques des activités physiques et sportives, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis.
- Goble, D. F. and S. H. Brown (2007). "Task-dependent asymmetries in the utilization of proprioceptive feedback for goal-directed movement." Experimental Brain Research **180**(4): 693-704.
- Gordon, J. (2000). "Power steering turns a corner." Motor Age **19**(8): 16-22.
- Green, P., T. Gillespie, et al. (1984). "Subjective evaluation of steering efforts levels." University of Michigan Transportation Research Institute.
- Guo, L., F. M. Cardullo, et al. (2003). "The results of a Simulator Study to Determine the Effects on Pilot Performance of Two Different Motion Cueing Algorithms and Various Delays, Compasated and Uncompensated." Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, Austin, Texas.
- Hart, S. G. (2006). "Nasa-task load index (Nasa-tlx); 20 years later." NASA- Ames Research Center.
- Hault-Dubrulle, A., F. Robache, et al. (2010). "Determination of pre-impact occupant postures and analysis of consequences on injury outcome. Part I: A driving simulator study." Accident Analysis & Prevention In Press, Corrected Proof.
- Hétier (2008). Analyse et quantification des comportements des conducteurs automobiles lors de phases de pré-crash : Contribution au développement d'un modèle de détection des postures de conduite en temps réel., Université de Valenciennes.
- Hofmann, P., G. Rinkenauer, et al. (2010). "Preparing lane changes while driving in a fixed-base simulator: Effects of advance information about direction and amplitude on reaction time and steering kinematics." Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour **13**(4): 255-268.
- Hostens, I. and H. Ramon (2005). "Assessment of muscle fatigue in low level monotonous task performance during car driving." Journal of Electromyography and Kinesiology **15**: 266-274.
- Hoult, W. and D. J. Cole (2007). "A neuromuscular model featuring co-activation for driver simulation." 20th IAVSD Symposium on the Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, Berkeley, USA.
- Innes, C. R. H., R. D. Jones, et al. (2007). "Sensory-motor and cognitive tests predict driving ability of persons with brain disorders." Journal of th Neurological sciences **260**: 188-198.
- Isomura, A., T. Hara, et al. (1995). "Human factors on driver's steering wheel operation: Three parameters evaluating characteristics of driver's steering wheel operations." Technical Notes/JSEA Review **16**: 383-410.
- Jamson, S. L. and A. H. Jamson (2010). "The validity of a low-cost simulator for the assessment of the effects of in-vehicle information systems." Safety Science **48**(10): 1477-1483.

- Jernigan, M. V., A. L. Rath, et al. (2003). "The effects of airbag deployment on severe upper extremity injuries in frontal automobile crashes." American Journal of Emergency Medicine **21**(2): 100-105.
- Jonsson, B. (2011). "Hand Position on Steering Wheel During Driving." Traffic Injury Prevention **12**(2): 187-190.
- Kandil, F., A. Rotter, et al. (2009). "Driving is smoother and more stable when using the tangent point." Journal of Vision **13**(1): 1-11.
- Kapandji, I. A. (1974). Physiologie articulaire, fascicule I, membre supérieur.
- Kemeny, A. and F. Panerai (2003). "Evaluating perception in driving simulation experiments." TRENDS in Cognitive Sciences **7**(1): 31-37.
- Lawton, C., S. Cook, et al. (2008). "Postural support strategies of disabled drivers and the effectiveness of postural support aids." Applied Ergonomics **39**(1): 47-55.
- Lee, H. C., D. Cameron, et al. (2003). "Assessing the driving performance of older adult drivers: on-road versus simulated driving." Accident Analysis and Prevention **35**(5): 797-803.
- Legnani, G., F. Casolo, et al. (1996). "A homogeneous matrix approach to 3D kinematics and dynamics .1. Theory." Mechanism and Machine Theory **31**(5): 573-587.
- Lemaire, P. (2006). "Psychologie cognitive." De Boeck Supérieur 2ème édition.
- Lempereur, M. (2006). "Simulation du mouvement d'entrée dans un véhicule automobile." Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambresis.
- Loslever, P. (1993). "Analysis in man-task system behavior studies." Behavioral Science **38**(2): 101-113.
- Loslever, P. (2001). "Obtaining information from time data statistical analysis in human component system studies. (I). Methods and performances." Information Sciences **132**(1-4): 133-156.
- Loslever, P. and S. Bouilland (2003). "Multidimensional signal exploration using multiple correspondence analysis. An example of a load lifting study." IEEE Transactions on Neural system and Rehabilitation engineering **11**(3): 301-310.
- Loslever, P., T.-M. Guerra, et al. (1997). "L'étape de caractérisation pour l'analyse des données temporelles I. Principe et évaluation." Journal Européen des Systèmes Automatisés **31**(2): 241-267.
- Lu, T. W. and J. J. Connor (1999). "Bone position estimation from skin marker co-ordinates using global optimisation with joint constraints." Journal of Biomechanics **32**(2): 129-134.
- Lundy, D. W. and G. M. Lourie (1998). "Two open forearm fractures after airbag deployment during low speed accidents." Clinical Orthopaedics and Related Research(351): 191-195.
- Luttgens, K. and K. Wells (1982). "Kinesiology : Scientific Basis of Human Motion." 7th ed. Saunders College, New York.
- Manno, R. (1992). "les bases de l'entrainement sportif." Ed. Revues EPS, Paris.
- Marieb, E. (1999). "Anatomie et Physiologie humaine." ed. De Boeck University, 4ème édition.

- Mars, F. (2006). "Driving in curves with constrained gaze orientation in the vicinity of the tangent point " 11th International Conference on Vision In Vehicles, Dublin, Ireland.
- Matsugaura, S., H. Nishimura, et al. (2005). "Development of a driver-monitoring vehicle based on ultra small electric vehicle." Journal of Asian Electric Vehicles **3**(2).
- Matthews, M. L. and L. R. Cousins (1980). "The influence of vehicle type on the estimation of velocity while driving." Ergonomics **23**(12): 1151-1160.
- McAllister, G., S. J. McKenna, et al. (2002). "Hand tracking for behaviour understanding." Image and Vision Computing **20**(12): 827-840.
- McGehee, D. V., J. D. Lee, et al. (2004). "Quantitative analysis of steering adaptation on a high performance fixed-base driving simulator." Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour **7**(3): 181-196.
- McLane, R. C. and W. W. Wierwille (1975). "The influence of motion and audio cues on driver performance in an automobile simulator." Human factors **17**(15): 488-501.
- Meskers, C. G. M., F. C. T. Van der Helm, et al. (1997). "In vivo estimation of the glenohumeral joint rotation center from scapular bony landmarks by linear regression." Journal of Biomechanics **31**(1): 93-96.
- Mestre, D. and C. Authier (2012). Why do we move our head during curve driving? Advances in Human Aspects of Road and Rail Transportation. N. A. Stanton, CRC Press: 412-419.
- Michon, J.-A. (1985). "A critical view of driver behavior models : what do we know, what should we do?" Human behavior and traffic safety: 485-520.
- Monacelli, E., F. Dupin, et al. (2009). "A review of the current situation and some future developments to aid disabled and senior drivers in France." Irbm **30**(5-6): 234-239.
- Morioka, M. and M. J. Griffin (2009). "Equivalent comfort contours for vertical vibration of steering wheels: Effect of vibration magnitude, grip force, and hand position." Applied Ergonomics **40**(5): 817-825.
- Morvan, H., K. Tan, et al. (2007). "Pre-crash investigation using a driving simulator and numerical analyses to determine the influence of the arms positions." International Journal of Crashworthiness **12**(5): 531-539.
- Naatanen, R. and H. Summala (1974). "A model for the role of motivational factors in driver's decision-making." Accident Analysis & Prevention **6**: 243-261.
- Nishiyama, S., N. Uesugi, et al. (2000). "Research on vibration characteristics between human body and seat, steering wheel, and pedals (effects of seat position on ride comfort)." Journal of Sound and Vibration **236**(1): 1-21.
- Pearson, E. J. M. (2009). "Comfort and its measurement - A literature review." Disability and Rehabilitation: Assistive Technology **4**(5): 301-310.
- Pennestri, E., R. Stefanelli, et al. (2007). "Virtual musculo-skeletal model for the biomechanical analysis of the upper limb." Journal of Biomechanics **40**(6): 1350-1361.
- Peters, B. (2001). "Driving performance and workload assessment of drivers with tetraplegia: An adaptation evaluation framework." Journal of Rehabilitation Research and Development **38**(2): 215-224.

- Pick, A. J. and D. J. Cole (2006 (a)). "Measurement of driver steering torque using electromyography." Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the Asme **128**(4): 960-968.
- Pick, A. J. and D. J. Cole (2006 (b)). "Neuromuscular dynamics in the driver-vehicle system." Vehicle System Dynamics **44**: 624-631.
- Pick, A. J. and D. J. Cole (2007). "Dynamic properties of a driver's arms holding a steering wheel." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D-Journal of Automobile Engineering **221**(D12): 1475-1486.
- Pick, A. J. and D. J. Cole (2008). "A mathematical model of driver steering control including neuromuscular dynamics." ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control.
- Pick, A. J., D. Cole (2006). "Measurement of driver steering torque using electromyography." Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the Asme **128**(4): 960-968.
- Rab, G., K. Petuskey, et al. (2002). "A method for determination of upper extremity kinematics." Gait & Posture **15**(2): 113-119.
- Rau, G., C. Disselhorst-Klug, et al. (2000). "Movement biomechanics goes upwards: from the leg to the arm." Journal of Biomechanics **33**(10): 1207-1216.
- Robertson, D. and J. Dowling (2003). "Design and responses of Butterworth and critically damped digital filters." Journal of Electromyography and Kinesiology **13**: 569-573.
- Rosey, F., J. M. Auberlet, et al. (2009). "Impact of Narrower Lane Width Comparison Between Fixed-Base Simulator and Real Data." Transportation Research Record(2138): 112-119.
- Rouanet, H. and B. Le Roux (1993). "Analyse des données multidimensionnelles: statistique en sciences humaines." Dunod: 309.
- Roux, E. (2002). "Mesure du mouvement supérieur et aide à l'interprétation clinique des données. ." thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambresis.
- Salvucci, D. D. and R. Gray (2004). "A two-point visual control model of steering." Perception **33**(10): 1233-1248.
- Sayarh (1991). "Contribution de l'analyse de données à l'étude locale et globale des signaux multidimensionnels : application à l'analyse des systèmes homme-machine." Thèse de doctorat en Automatique Industrielle et Humaine, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis.
- Schiro, J., F. Gabrielli, et al. (2011). "Estimation de l'angle de flexion extension du coude dans une tâche de tourner le volant en l'absence du marqueur médial de l'épicondyle de l'humérus." Conférence ACAPS, Rennes.
- Schiro, J., F. Gabrielli, et al. (2012 (b)). "Steering wheel hand position in low speed maneuvers." Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour (soumis).
- Schiro, J., F. Gabrielli, et al. (2011). "Validation d'une consigne visuelle 2D pour l'analyse du geste chez le conducteur automobile." Conférence ASSISTH, Paris, 2011.
- Schmidt, R., C. Disselhorst-Klug, et al. (1999). "A marker-based measurement procedure for unconstrained wrist and elbow motions." Journal of Biomechanics **32**(6): 615-621.

- Senk, M. and L. Cheze (2006). "Rotation sequence as an important factor in shoulder kinematics." Clinical Biomechanics **21**: 3-8.
- Soderkvist, I. and P. Wedin (1993). "Determining the movements of the skeleton using well-configured markers." Journal of Biomechanics **26**(12): 1473-1477.
- Soffe, K. E., J. F. Quinlan, et al. (2003). "An open forearm fracture with intermedullary foreign body plug - a complication of airbag deployment." Injury-International Journal of the Care of the Injured **34**(4): 312-315.
- Stoffregen, T. A. and B. G. Bardy (2001). "On specification and the senses." Behavioral and Brain Sciences **24**: 195-261.
- Summala, H., T. Nieminen, et al. (1996). "Maintaining lane position with peripheral vision during in-vehicle tasks." Human Factors **38**(3): 442-451.
- Temprado, J. and G. Montagne (2001). "Les coordinations perceptivo-motrices." Armand Colin.
- Thomas, J. A. and D. Walton (2007). "Measuring perceived risk: Self-reported and actual hand positions of SUV and car drivers." Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour **10**(3): 201-207.
- Treffner, P., R. Barrett, et al. (2002 (b)). "Stability and skill in driving." Human Movement Science **21**: 749-784.
- Treffner, P., R. Barrett, et al. (2002 (a)). "Active stabilisation and perceptual sensitivity in safe driving." Developing safer drivers and riders (Proceedings of Travelsafe- Australian College of Road Safety conference): 91-104.
- Tufte, E. (1983). "The visual display of quantitative information." Graphics Press.
- Van der Helm, F. C. T. and G. M. Pronk (1995). "Three-dimensional recording and description of motions of the shoulder mechanism." Journal of Biomechanical Engineering(0148-0731 (Print)): 27-40.
- Van Der Molen, H. H. and M. T. Böttcher (1988). "A hierarchical risk model for traffic participants." Ergonomics **31**(4): 537-555.
- Veldpaus, F. E., H. J. Woltring, et al. (1988). "A least-squares algorithm for the equiform transformation from spatial marker co-ordinates." Journal of Biomechanics **21**(1): 45-54.
- Volkswagen of America Inc (2004). "Electro-mechanical Power Steering - Design and Function." Self-Study Program - Course Number 892403.
- Walton, D. and J. A. Thomas (2005). "Naturalistic observations of driver hand positions." Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour **8**(3): 229-238.
- Wang, X. (1999). "A behavior-based inverse kinematics algorithm to predict arm prehension postures for computer-aided ergonomic evaluation." Journal of Biomechanics **32**(5): 453-460.
- Wang, X. (1999). "A behavior-based inverse kinematics algorithm to predict arm prehension postures for computer-aided ergonomic evaluation." Journal of Biomechanics **32**(5): 453-460.
- Weir, D. and K. Chao (2005). "Review of control theory models for directional and speed control." International workshop On Modelling Driver Behaviour In Automotive Environments, Ispra, Italy: 25-37.



## Bibliographie

---

- Wilson, M., M. Chattington, et al. (2008). "Eye movements drive steering: reduced eye movement distribution impairs steering and driving performance." Journal of Motor Behavior **40**(3): 190-202.
- Wu, G., F. C. T. van der Helm, et al. (2005). "ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion--Part II: shoulder, elbow, wrist and hand." Journal of Biomechanics **38**(5): 981-992.
- Wu, G., F. C. T. van der Helm, et al. (2005). "ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion"Part II: shoulder, elbow, wrist and hand." Journal of Biomechanics **38**(5): 981-992.
- Zadeh, L. A. (1965). "Fuzzy sets." Information and Control **8**(3): 338-353.





### Résumé

Tourner le volant d'une automobile peut s'avérer difficile pour les conducteurs ayant des déficiences motrices des membres supérieurs. En effet, ce mouvement demande une grande mobilité et une force musculaire non négligeable. A ce jour, les directions assistées automobiles sont réglées uniquement sur le ressenti des conducteurs sans déficiences motrices. Le projet ANR VTT VolHand, dans lequel ce travail de recherche s'inscrit, ambitionne d'apporter une réponse à cette problématique. L'objectif de cette thèse est de renseigner la biomécanique du geste déjà chez le conducteur sans déficiences motrices (sain). Pour cela, l'interaction main/volant, ainsi que la cinématique (ex. angles articulaires) et la dynamique (ex. efforts sur volant, efforts articulaires) du geste de tourner le volant sont étudiés au travers de plusieurs analyses multidimensionnelles multi variables (atemporelle et temporelle). La méthode originale proposée s'appuie sur un découpage flou du volant et des variables cinématiques et dynamiques. La population expérimentée compte une centaine de sujets, dont 23 sujets sans déficience motrice. La plateforme expérimentale regroupe principalement un simulateur automobile compact permettant le recueil des efforts développés par chaque main, une consigne de suivi de trajectoire incitant le conducteur à reproduire un angle désiré et un système optoélectronique mesurant le geste de tourner le volant.

Les résultats de l'analyse de l'interaction main/volant mettent en évidence 3 profils de conducteurs : les conducteurs croiseurs, les conducteurs croiseurs asymétriques et les conducteurs non croiseurs. L'analyse des variables cinématiques et dynamiques montrent que les variables dynamiques résultant du tirer/pousser le volant sont discriminantes. Deux nouveaux profils sont alors identifiés : les pousseurs moyens et les tireurs. En majorité, les conducteurs sains tendent à croiser les mains et à pousser sur le volant lors de la réalisation d'un geste de tourner le volant à basse vitesse.

Plusieurs perspectives sont proposées à court terme, à moyen terme et à long terme. L'une d'entre elles concerne l'adaptation de l'assistance aux caractéristiques motrices des conducteurs avec déficience motrice.

*Mots clés : geste de tourner le volant, dynamique inverse, analyse factorielle des correspondances multiples, handicap.*

### Abstract

Steering wheel can be difficult for drivers with disabilities on upper limb. Indeed, the steering action might require a large range of motion of upper limb and some muscular strength. Power steering systems that are currently proposed in car were implemented to match non disabled driver feelings and needs. ANR VTT VolHand project wants to enlarge the field of power steering system to drivers with disabilities on upper limbs. The present work is a part of this project. As a preliminary approach, the objective was to analyze the upper limb motion of healthy drivers during a steering exercise. Different multivariable analyses (low level of time summarizing and high level of time summarizing) were done to study hand/wheel interactions, kinematics variables (e.g. joint angles) and dynamics variables (e.g. joint torques). An original fuzzy windowing was proposed to describe hand position on steering wheel, kinematic and dynamics variables. One hundred subjects participated to experiment, included 23 healthy subjects, which consisted on a low speed steering task. The experimental platform was composed of a compact driving simulator, that allow the measurement of each hand effort on the steering wheel, a steering exercise based on a line following protocol, and a motion capture system.

Analysis of hand/wheel interaction showed the existence of three driver profiles: hand crossing, asymmetric hand crossing and non hand crossing. Analysis of kinematics and dynamics variables showed that pulling/pushing forces were also discriminating. As a consequence, two additional profiles were identified: mean pushing drivers and pulling drivers. Overall, healthy drivers were « hand crossing » and « mean pushing drivers » during a low speed steering task.

Short, middle and long prospects are proposed. One of them concerns automotive power steering system adaptation for disabled drivers.

*Keywords : steering wheel, inverse dynamics, multiple correspondance analysis, handicap.*